

Faculté des bioingénieurs

Évaluation de la santé des sols urbains : étude de cas sur le campus de l'UCLouvain

Auteur : Duy Thang Tanguy Do
Promoteur : Yannick Agnan (ELIE)
Lecteur·rices : Charles Bielders (ELIE)
Lola Leveau (ELIA)
Année académique 2022-2023
Bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la bonne réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie infiniment mon promoteur Yannick Agnan pour sa disponibilité, sa réactivité, ses innombrables conseils, son accueil et surtout pour le temps qu'il m'a accordé.

Ensuite, je tiens à remercier toute l'équipe de recherche du labo SOLS qui ont répondu à mes interrogations ainsi qu'à tous les techniciens et techniciennes qui m'ont aidé à réaliser à bien mes expériences en laboratoire.

Par la suite, je tiens également à remercier mes camarades mémorants du labo SOLS qui m'ont aidé et accompagné pour la plupart de mes manipulations pratiques, mais également mes camarades d'autres labo, qui ont su m'aider lors d'autres activités.

Je remercie Lola Leveau et Charles Biolders d'avoir accepté d'être les lecteurs et pour l'intérêt qu'ils portent pour mon travail.

Finalement, je remercie mes amis proches ainsi que ma famille pour leur soutien constant.

Table des matières

1. INTRODUCTION	8
2. ÉTAT DE L'ART	10
2.1. ENJEUX DE LA SANTÉ DES SOLS	10
2.1.1. Définition de la santé des sols	10
2.1.2. Services écosystémiques fournis par des sols en bonne santé	11
2.1.3. Liens avec les objectifs de développement durable	12
2.1.4. Caractéristiques et enjeux des sols urbains	12
2.1.5. Menaces de la santé des sols	14
2.2. CARACTÉRISATION DE LA SANTÉ DES SOLS	18
2.2.1. Caractérisation biologique	19
2.2.2. Caractérisation chimique	20
2.2.3. Caractérisation physique	24
2.3. INDICES DE SANTÉ DES SOLS	25
3. OBJECTIFS.....	27
4. MATERIEL ET METHODE	28
4.1. SITES D'ÉTUDE	28
4.1.1. Contexte environnemental du périmètre d'étude	28
4.1.2. Choix des sites d'étude	28
4.2. METHODOLOGIE D'ÉCHANTILLONNAGE	31
4.3. CARACTERISATION CHIMIQUE.....	33
4.3.1. pH _{eau}	33
4.3.2. Capacité d'échange cationique	33
4.3.3. Carbone total et azote total	35
4.3.4. Matière organique	36
4.3.5. Nitrates, nitrites et ammonium	36
4.3.6. Éléments traces métalliques.....	36
4.4. CARACTERISATION PHYSIQUE	38
4.4.1. Structure	38
4.4.2. Granulométrie	39
4.5. CARACTERISATION BIOLOGIQUE	41
4.5.1. Activité des microorganismes via le Tea Bag Index	41
4.5.2. Vers de terre	42
4.6. TRAITEMENT DE DONNEES	42
4.6.1. Descriptions géographiques des sites d'études	42
4.6.2. Analyses statistiques.....	42
5. RESULTATS	43
5.1. CARACTERISATION GEOGRAPHIQUE	43
5.2. CARACTERISATION CHIMIQUE DES SITES	45
5.2.1. pH.....	45
5.2.2. Capacité d'échange cationique, taux de saturation & cations échangeables.....	46
5.2.3. Carbone total & matière organique	48
5.2.4. Azote total et formes d'azote	51
5.2.5. Rapport C/N	53
5.2.6. Calcium, fer & manganèse.....	53
5.2.7. Éléments traces métalliques.....	54
5.3. CARACTÉRISATION PHYSIQUE DES SITES	56
5.3.1. Granulométrie	56
5.3.2. Structure et compaction	57
5.4. CARACTÉRISTIQUES BIOLOGIQUES DES SITES.....	59
5.4.1. Tea bag Index.....	59
5.4.2. Vers de terre	60

6.	DISCUSSION GÉNÉRALE	63
6.1.	CORRÉLATIONS ENTRE LES PARAMÈTRES DU SOL	63
6.2.	DISCUSSION DE LA SANTÉ GLOBALE DES SITES URBAINS ET USAGES POTENTIELS	68
6.2.1.	Site Témoin	68
6.2.2.	Parcs.....	69
6.2.3.	Zones artificialisées.....	69
6.2.4.	Zone non-affectée	70
6.2.5.	Classification des sites d'études en fonction des paramètres	70
7.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	73
8.	ANNEXES.....	75
9.	RÉFÉRENCES	87

Listes des figures

FIGURE 1 - HIÉRARCHIE ENTRE FERTILITÉ, QUALITÉ, SANTÉ ET SÉCURITÉ DES SOLS (LEHMANN ET AL., 2020).....	10
FIGURE 2 - SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES APPORTÉS PAR UN SOL EN BONNE SANTÉ (LAL, 2016)	11
FIGURE 3 - ÉVOLUTION DU NOMBRE DE PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES SUR LES SOLS (HISTOGRAMME BLEU) ET SUR LES SOLS URBAINS (HISTOGRAMME ORANGE) DURANT LA PÉRIODE 1990-2016(GUILLAND ET AL., 2018) 13	
FIGURE 4 - PROPORTION D'IMPERMÉABILISATION DES SOLS EN EUROPE (EUROPEAN COMMISSION, 2006).....	14
FIGURE 5. FRÉQUENCE DES PARAMÈTRES BIOLOGIQUES (VERT), CHIMIQUES (ROUGE) ET PHYSIQUES (BLEU) UTILISÉS DANS L'ÉTUDE DE LA QUALITÉ DES SOLS (LEHMANN ET AL., 2020)	18
FIGURE 6 - QUELQUES PROCESSUS BIOGÉOCHIMIQUES EN LIEN AVEC LE PH (NEINA, 2019)	20
FIGURE 7 - CYCLE DE L'AZOTE SIMPLIFIÉ DU SYSTÈME SOL-PLANTE (HOFMAN AND CLEEMPUT, 2004)	22
FIGURE 8 - PARAMÈTRES BIOLOGIQUES, PHYSIQUES, CHIMIQUES INCLUS DANS LES INDICES DE LA SANTÉ DES SOLS (LEHMANN ET AL., 2020)	26
FIGURE 9 - LOCALISATION DES SITES D'ÉTUDES DE LOUVAIN-LA-NEUVE	29
FIGURE 10 - PARCELLE TÉMOIN À LOUVAIN-LA-NEUVE	30
FIGURE 11 – EXEMPLE D'UN PARC (PARC À LAPINS) À LOUVAIN-LA-NEUVE	30
FIGURE 12 – EXEMPLE D'UN SITE ARTIFICIALISÉ (PARKING SAINTE-BARBE) À LOUVAIN-LA-NEUVE	30
FIGURE 13 – MÉTHODOLOGIE D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN.....	31
FIGURE 14 - METHODOLOGIE GENERALE DES CARACTERISATIONS DU SOL.....	32
FIGURE 15 - SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA DÉTERMINATION DE LA CEC	33
FIGURE 16 - CONSTRUCTION DES COLONNES D'EXPÉRIMENTATION	34
FIGURE 17 - TEST À LA BÈCHE	38
FIGURE 18 - DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL POUR	38
FIGURE 19 - SACHETS DE THÉ SYNTHÉTIQUES UTILISÉS POUR LE CALCUL DU TEA BAG INDEX.....	41
FIGURE 20 – CARTE D'OCCUPATION DU SOL À LLN EN 2018 (WALOUS).....	43
FIGURE 21 - PH MOYEN DES SITES D'ÉTUDES DE LOUVAIN-LA-NEUVE.....	45
FIGURE 22 - CEC MOYENNE [CMOL _c /KG] DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE	46
FIGURE 23 - TAUX DE SATURATION MOYEN [%] DE LA CEC PAR LES DIFFÉRENTS CATIONS ÉCHANGEABLES DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE.....	47
FIGURE 24 - CARBONE TOTAL [%] MOYEN DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE	49
FIGURE 25 - CARBONE TOTAL [%] EN FONCTION DE LA PERTE AU FEU 550 °C [%] DES SITES DE LOUVAIN-LA- NEUVE.....	50
FIGURE 26 - AZOTE TOTAL [%] MOYEN DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE	51
FIGURE 27 – CONCENTRATION [MG/KG] EN NITRATES DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE.....	52
FIGURE 28 - RAPPORT C/N MOYEN DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE.....	53
FIGURE 29 – TRIANGLE TEXTURAL DES SITES D'ÉTUDE DE LOUVAIN-LA-NEUVE	56
FIGURE 30 - ÉVOLUTION DE LA MASSE [%] DU SITE TOTAL AU COURS DU TEMPS [MIN]	57
FIGURE 31 – SITES TOTAL SUJET À DES ACTIVITÉS DE CONSTRUCTIONS.....	57
FIGURE 32 - ABONDANCE DES VERS DE TERRE [INDIVIDUS/M ³] DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE.	61
FIGURE 33 - GAMMES DE VARIATION POUR L'ABONDANCE MOYENNE [INDIVIDUS/M ³] SELON L'USAGE DU SOL . 61	
FIGURE 34 - MATRICE DE CORRÉLATION (COEFFICIENT DE PEARSON) ENTRE LES PARAMÈTRES D'ÉTUDE AU SEIN DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE.	64
FIGURE 35 - ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES PARAMÈTRES DE CARACTÉRISATION DE LA SANTÉ DU SOL DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE PRÉSENTANT LES CORRÉLATIONS ET ANTI-CORRÉLATIONS ENTRE LES DIFFÉRENTES VARIABLES.	72
FIGURE 36 - ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES PARAMÈTRES DE CARACTÉRISATION DE LA SANTÉ DU SOL DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE LES SITES RÉPARTIS EN FONCTION DE QUATRE USAGES.....	72

Listes des tableaux

TABEAU 1 - LIEN ENTRE LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLES & LA SANTÉ DES SOLS (HEAD ET AL., 2020).....	12
TABEAU 2- LOCALISATION ET USAGE DES SITES D'ÉTUDE DE LOUVAIN-LA-NEUVE	28
TABEAU 3 - DEGRÉ D'ARTIFICIALISATION ET USAGE DES SITES D'ÉTUDES DE LOUVAIN-LA-NEUVE.....	44
TABEAU 4 – CEC MOYENNE [CMOL _c /KG] ET TAUX DE SATURATION [%] DES DIFFÉRENTS SITES D'ÉTUDES DE LOUVAIN-LA-NEUVE	47
TABEAU 5 - OCCUPATION MOYENNE DE LA CEC [%] DES DIFFÉRENTES CATIONS ÉCHANGEABLES DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE	48
TABEAU 6 - PERTES AU FEU À 550 °C ET 1000 °C ET ESTIMATION DU CARBONE ORGANIQUE [%] DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE	51
TABEAU 7 - FORMES D'AZOTE [MG/KG] MOYEN DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE	52
TABEAU 8 – TENEURS MOYENNE (± ÉCART-TYPES) EN FER, MANGANÈSE ET CALCIUM [MG/KG] DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE	54
TABEAU 9 – COMPARAISON DES VALEURS MOYENNES (± ÉCART-TYPES) DES ETM [MG/KG] DU SITE TÉMOIN AVEC LES SEUILS FIXÉS PAR LE DÉCRET SOLS (USAGE AGRICOLE)	54
TABEAU 10 - COMPARAISON DES VALEURS MOYENNES (± ÉCART-TYPES) DES ETM [MG/KG] DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE AVEC LES SEUILS FIXÉS PAR LE DÉCRET SOLS (USAGE RÉCRÉATIF)	55
TABEAU 11 - STRUCTURE DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE	58
TABEAU 12 - Tea BAG INDEX ET FACTEUR DE STABILISATION DES SITES DE LOUVAIN-LA-NEUVE.....	60
TABEAU 13 - ABONDANCE DES GROUPES FONCTIONNELS DE VERS DE TERRE [INDIVIDUS/M ³], NOMBRE DE GROUPES FONCTIONNELS ET INDICES DE DIVERSITÉ FONCTIONNEL	62
TABEAU 14 - CEC TYPIQUES DES TEXTURES (MUNROE ET AL., 2015).....	66

Liste des annexes

ANNEXE 1 - PHOTOS DES SITES	79
ANNEXE 2 - TABLEAU RÉCAPITULATIF DES PARAMÈTRES DES SITES D'ÉTUDE DE LOUVAIN-LA-NEUVE.....	81
ANNEXE 3 - DROITE DE CALIBRATION DE LA CEC.....	82
ANNEXE 4 - ÉVALUATION VISUELLE DE LA STRUCTURE DU SOL	82
ANNEXE 5- CLÉ D'IDENTIFICATION DES VERS DE TERRE	83
ANNEXE 6 - RECOUVREMENT DES SOLS DES SITES.....	83
ANNEXE 7 - SEUILS DE VALEURS CONSIDÉRÉES DES ETM [PPM] SELON LE DÉCRET SOL (LEGIFRANCE, 2017)	84
ANNEXE 8 - CATIONS ÉCHANGEABLES MOYENNES [CMOLC/KG] DES SITES.....	84
ANNEXE 9 - GRANULOMÉTRIE MOYENNE DES SITES	85
ANNEXE 10 - GAMMES DE VARIATION POUR L'ABONDANCE MOYENNE (UNIVERSITE DE RENNES, 2023)	86
ANNEXE 11 - INDICE DE DIVERSITÉ FONCTIONNELLE SELON LE NOMBRE DE GROUPES FONCTIONNELS PRÉSENTS.	86

1. Introduction

La santé des sols se définit comme étant « la capacité continue des sols à fonctionner comme un écosystème vivant et vital qui soutient les plantes, les animaux et l'humain » (Lehmann et al., 2020). Elle se distingue donc de la qualité des sols, davantage lié à l'agriculture et la production végétale, au vu de la portée de la santé des sols qui s'étend au-delà de l'humain avec des objectifs de durabilité pour l'ensemble des écosystèmes.

Elle constitue actuellement un enjeu majeur puisque son déclin s'observe partout dans le monde. Ce déclin est provoqué par plusieurs menaces : le changement d'utilisation des sols (l'agriculture et l'urbanisation par exemple) modifiant entre autres la circulation de l'eau et le recyclage des éléments, la pollution chimique liées aux industries (incluant les polluants émergents comme les plastiques), le changement climatique modifiant température et humidité du sol en plus d'amplifier la fréquence et l'intensité d'événements météorologiques extrêmes comme les inondations et les sécheresses, *etc.*

Il s'avère donc primordial de conserver, voire d'améliorer, la santé des sols pour assurer les fonctions essentielles pour les écosystèmes. En effet, s'ils sont en bonne santé, les sols fournissent de nombreux services écosystémiques. Notons que les fonctions sont les processus, et les services écosystémiques sont les propriétés qui résultent de ces processus (Blanchart and de Tourdonnet, 2010). Par exemple, le cycle du carbone du sol est une fonction tandis que la séquestration du carbone dans le sol est un service. Parmi les services écosystémiques de sols en bonne santé, citons la mise à disposition de nutriments pour les organismes vivants comme les plantes, l'atténuation du changement climatique grâce à la séquestration du carbone atmosphérique, le stockage d'une partie de l'eau accessible pour ces organismes ou encore la mise à disposition d'habitats pour l'installation d'espèces vivant dans le sol. La biodiversité étant essentielle à la bonne santé des sols puisqu'elle régule de nombreux mécanismes comme l'aération du sol et la mise à disposition de nutriments, les services écosystémiques fournis dépendent indirectement de la biodiversité des sols.

Ce mémoire vise à évaluer la santé des sols urbains à l'échelle de la ville de Louvain-la-Neuve, et plus particulièrement sur le campus de l'Université catholique de Louvain (UCLouvain) dans le cadre du Plan Transition lancé en 2021 par l'UCLouvain. Ce dernier est construit autour de trois grandes thématiques : le premier pilier est l'enseignement visant à « acquérir des acquis d'apprentissage transversaux liés au développement durable, donner de la visibilité aux cours disciplinaires et aux programmes spécialisés liés au développement durable dans les programmes de master ». Les étudiants en master sont invités à y participer en travaillant sur l'environnement et la durabilité afin de donner de la visibilité à ces thématiques. Le deuxième pilier est la recherche dont l'objectif est de « stimuler et soutenir l'émergence des recherches interdisciplinaires et transdisciplinaires dans le champ du développement durable et de la transition ». Des indicateurs d'évaluation de la qualité de l'air, de l'eau, du sol et de la biodiversité sont développés afin de caractériser au mieux l'environnement dans laquelle est implanté l'université. Le troisième et dernier pilier concerne les campus durables et s'articule autour de différentes thématiques comme l'énergie, la biodiversité, la mobilité, l'alimentation, *etc.* L'objectif Bio1 est de « favoriser la faune et la flore, les habitats et les continuités écologiques sur les sites de l'UCLouvain ». Cet objectif passe par une plus grande verdurisation des campus car l'état des lieux actuel permet d'affirmer que le cœur urbanisé des campus de

Louvain-la-Neuve est l'un des grands points faibles de l'université en matière de durabilité. Leur verdurisation permettrait l'augmentation de la biodiversité au sein-même de l'université, *via* notamment l'augmentation de la connectivité écologique, mais aussi d'augmenter sa résilience quant au changement climatique.

L'objectif de ce mémoire est d'établir un état des lieux concernant la santé des sols à Louvain-la-Neuve. Des échantillons de sols sont prélevés dans dix sites en considérant des types d'environnements contrastés comme des parcs, des zones piétonnes et des parkings. Une caractérisation des principaux paramètres biologique, chimique et physique est réalisée pour apprécier la santé de chacun des sites urbains considérés et comparer les types d'environnements en vue de proposer de potentielles solutions pour améliorer leur santé. Cette étude préliminaire pourra être étendue ultérieurement sur l'ensemble du territoire de Louvain-la-Neuve.

2. État de l'art

2.1. Enjeux de la santé des sols

2.1.1. Définition de la santé des sols

Le sol est défini comme étant un système complexe présent à l'interface entre l'atmosphère, la lithosphère et l'hydrosphère (Lehmann et al., 2020). Il est essentiel pour de nombreux services comme la production de nourriture, la séquestration du carbone et l'atténuation du changement climatique (Lal, 2016). Afin de caractériser ces fonctions, plusieurs termes ont été établis, tel un emboîtement depuis la fertilité des sols jusqu'à la sécurité des sols (**Error! Reference source not found.**).

La qualité du sol correspond à sa capacité à fonctionner pour l'agriculture et son environnement immédiat, c'est-à-dire l'eau, l'air et le vivant en contact direct avec le sol agricole (Lehmann et al., 2020). Elle est donc majoritairement liée au service de production d'aliments à des fins d'utilisation par l'humain. Ce terme fait écho à la fertilité des sols à l'échelle locale de l'agriculteur.

Il est établi que la santé des sols se distingue de la qualité des sols car sa portée s'étend bien au-delà de l'humain avec des objectifs qui concerne l'ensemble de l'écosystème planète. Elle se réfère à la capacité du sol à agir en tant qu'écosystème vivant et vital, fournissant un soutien essentiel aux plantes, aux animaux et aux humains (Lehmann et al., 2020). La santé des sols donne une grande importance aux paramètres biologiques, elle se différencie de la qualité des sols qui est principalement axée sur une caractérisation physique et chimique et se focalise généralement peu sur les fonctions du sol. Cependant, il convient de noter que la santé des sols est un terme complexe, une fonction étant toujours rattachée à un type de sol selon son utilisation. Par exemple, un sol peut être en bonne santé si l'objectif est la production de bois (écosystème forestier), mais en mauvaise santé pour la production agricole (agroécosystème). La capacité à remplir certaines fonctions peut être en conflit direct avec la capacité à en remplir d'autres (Baveye, 2021).

La sécurité des sols, enfin, est un terme qui a récemment été introduite pour que l'accès aux services écosystémiques du sol soit au même niveau que les autres droits humains (Lehmann et al., 2020). Le sol est considéré ici comme un bien commun similaire à l'eau et à l'air et non pas comme une propriété privée. Ce dernier est davantage utilisé dans un contexte politique.

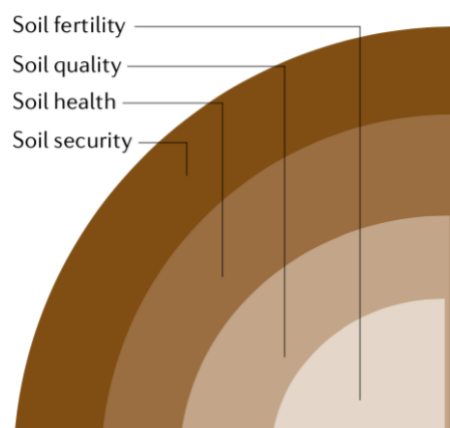


Figure 1 - Hiérarchie entre fertilité, qualité, santé et sécurité des sols (Lehmann et al., 2020)

2.1.2. Services écosystémiques fournis par des sols en bonne santé

Certaines fonctions fournies par des sols en bonne santé sont une base nécessaire au bon développement des espèces vivantes. Or, les services écosystémiques liés au sol ne peuvent être uniquement remplis correctement que si celui-ci est en bonne santé (**Error! Reference source not found.**).

Il existe une multitude de services écosystémiques fournis par les sols (Lal, 2016). Parmi eux, la production de nourriture *via* les plantes et les animaux constitue l'objectif principal de l'agriculture. Cette production d'aliments est possible grâce aux fonctions de recyclage, de transformation, de stockage et de la mise à disposition de nutriments pour les plantes. Le stockage de l'eau est aussi primordiale pour l'agriculture *via* la mise en réserve temporaire de l'eau avant de la restituer aux plantes. Le sol peut également modifier la qualité de l'eau en constituant une source ou un puits de polluants pour l'eau. L'atténuation du changement climatique *via* la séquestration du carbone par le sol est un service dont l'importance est croissante au vu de l'impact environnemental de l'augmentation des gaz à effets de serre à l'échelle globale. Dans ce contexte, certaines pratiques culturales sont encouragées pour favoriser cette séquestration. En parallèle de ces grands services, citons l'approvisionnement de matériaux primaires (les minéraux par exemple) ou encore le support pour la vie en fournissant un habitat pour les organismes, et plus particulièrement pour les microorganismes.

Les sols sont à la base du développement économique. Ils conditionnent la gestion de l'eau, la stabilisation du système climatique, la production de biomasse et donc de nourriture... La gestion des sols est essentielle pour garantir leur bonne santé et, par conséquent, les services écosystémiques qu'ils fournissent. Il convient de noter que la gestion de la santé des sols doit prendre en compte trois points essentiels (Tibbett et al., 2020) : (1) une gestion multifonctionnelle est nécessaire à l'amélioration des services écosystémiques du sol ; (2) améliorer un service peut avoir des effets positifs (synergiques) ou négatifs (compromis) sur un autre service ; et (3) la gestion de la santé des sols se doit d'être poursuivie sur le long terme.

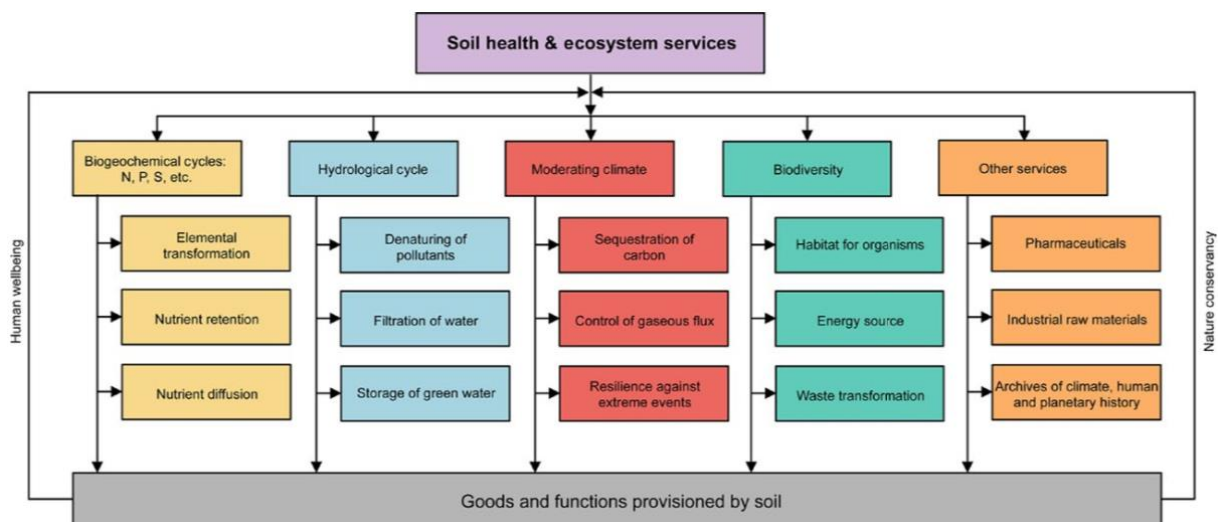


Figure 2 - Services écosystémiques apportés par un sol en bonne santé (Lal, 2016)

2.1.3. Liens avec les objectifs de développement durable

La multi-dimensionnalité de la santé des sols permet d'être en accord avec certains objectifs de développement durable (ODD). Au nombre de 17, ceux-ci ont été définis en 2015 par les Nations Unies et ont pour objectifs principaux la protection de la planète et l'éradication de la pauvreté (Bodiguel, 2015).

Bien que l'amélioration de la santé des sols permettrait d'aider à atteindre certains de ces objectifs (Lal, 2016), il apparaît que le sol n'est que pauvrement représenté dans les objectifs et les indicateurs des ODD (Head et al., 2020). Aucun des 17 ODD ne se concentre spécifiquement sur les sols même s'ils se retrouvent dans un bon nombre d'entre eux.

L'amélioration de la santé des sols est en lien de près ou de loin avec la plupart des ODD (Tableau 1) et permettrait de traiter principalement certains objectifs dont ceux liés à la réduction de la pauvreté (n°1), à l'élimination de la faim (n°2), à l'amélioration de la santé (n°3), à l'eau potable (n°6), à la croissance économique (n°8) et à l'action climatique (n°13).

La dégradation des sols ralentit la réalisation de nombreux ODD qui reposent sur la bonne santé des sols. Cela est associé à un manque important de volonté des responsables politiques se traduisant par une législation sur la santé des sols trop superficielle, tant à l'échelle nationale qu'à l'échelle locale. Ainsi, l'évaluation de l'état de santé des sols sur de vastes zones s'avère difficile (Head et al., 2020).

Tableau 1 - Lien entre les objectifs de développement durables & la santé des sols (Head et al., 2020)

N°	Objectif	Impact de la santé des sols
1	Pas de pauvreté	Augmenter les revenus agricoles
2	Éliminer la faim	Améliorer la quantité et la qualité des aliments
3	Bonne santé	Produire des aliments nutritifs
6	Eau potable et assainissement	Améliorer la qualité de l'eau
8	Croissance économique	Un moteur de développement économique
10	Inégalités réduites	Valoriser et pérenniser les exploitations
12	Consommation responsable	Réduire l'apport d'eau, de nutriments et d'énergie en diminuant les pertes
13	Action pour le climat	Séquestrer C et atténuer le changement climatique
15	La vie sur terre	Augmenter l'activité et la diversité des espèces du biote du sol

2.1.4. Caractéristiques et enjeux des sols urbains

Les sols urbains représentent un sous-ensemble des sols anthropisés, qui sont localisés uniquement dans des environnements fortement influencé par l'humain comme les zones résidentielles, les zones industrielles et commerciales, les espaces verts et jardins, etc. (Damas and Coulon, 2016) Au sein des villes, des sols très transformés par l'activité humaine et des sols proches de sols naturels peuvent coexister. La caractéristique principale des sols urbains est de présenter une forte hétérogénéité spatiale. De plus, ces sols sont soumis à des changements fréquents d'utilisation en raison de l'évolution de la ville, ce qui entraîne des modifications dans leur usage et dans leur aménagement.

Les projections estiment que d'ici 2050, deux personnes sur trois vivront en ville (United Nations, 2018). En raison à la fois des changements et de la croissance démographique globale, cela signifie qu'environ 2,5 milliards de personnes pourraient être ajoutées aux zones urbaines d'ici le milieu du siècle. Ces chiffres mettent en avant l'importance d'une planification intelligente et durable de l'urbanisme. Ces changements démographiques induisent une pression anthropique croissante. En effet, les dommages sur l'environnement urbain, et particulièrement sur les sols, sont multiples comme la pollution, l'artificialisation et la perte de biodiversité.

Très peu d'études sur la santé des sols urbains ont été réalisées à ce jour (Guilland et al., 2018). La Figure 3 met en avant la faible considération d'articles scientifiques concernant les sols urbains dans le domaine de la pédologie. Bien que la santé du sol urbain soit perçue comme un paramètre environnemental important, il reste un problème secondaire dans la planification urbanistique car les acteurs des décisions ont très peu de connaissances scientifiques et techniques dans ce domaine.

Cependant, il y a un besoin d'une meilleure connaissance de la gestion des sols urbains parce que ceux-ci remplissent de nombreux services écosystémiques. Ces services étaient autrefois majoritairement décrits dans le domaine de l'agriculture, ce n'est que récemment que les services spécifiques aux sols urbains ont été intégrés. Les services rendus par les écosystèmes spécifiquement urbains comprennent principalement la régulation du cycle de l'eau, la filtration et le stockage de la pollution urbaine, l'approvisionnement en nutriments, l'atténuation de la pollution de l'air et des îlots de chaleur urbains, ainsi que le support pour la végétation et pour l'habitat de la biodiversité.

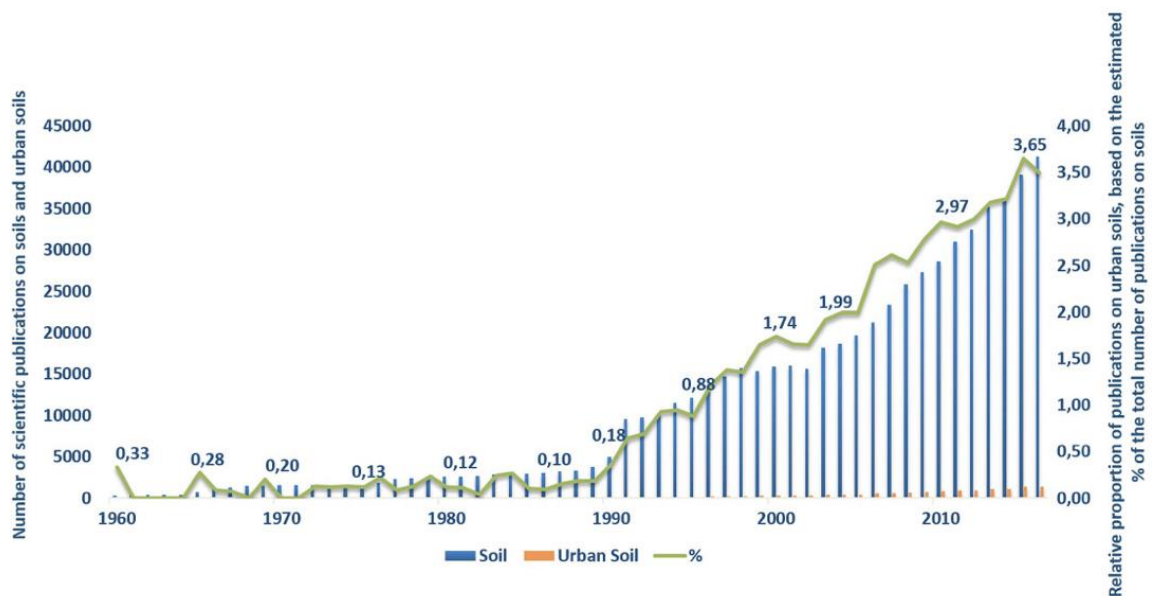


Figure 3 - Évolution du nombre de publications scientifiques sur les sols (histogramme bleu) et sur les sols urbains (histogramme orange) durant la période 1990-2016 (Guilland et al., 2018). La courbe verte représente les changements dans la proportion relative de publications sur les sols urbains, sur la base du pourcentage estimé du nombre total de publications sur les sols.

2.1.5. Menaces de la santé des sols

Le déclin de la santé des sols observé partout dans le monde résulte d'une série de menaces liées principalement à l'activité humaine. Ces menaces représentent des défis majeurs pour la durabilité et la résilience des écosystèmes terrestres. Une liste non exhaustive de ces menaces est exposée dans cette section, mettant en évidence leur impact sur les fonctions et les services des sols.

- **Le changement de l'utilisation des terres**

L'urbanisation des sols liée à l'augmentation de la population provoque l'imperméabilisation des sols, correspondant à la destruction ou au recouvrement des sols par des bâtiments et des couches de matériaux artificiels totalement ou partiellement imperméables (European Commission, 2016). L'urbanisation est l'occupation des sols par l'humain qui a le plus d'impact sur l'environnement et est essentiellement un processus irréversible.

Chaque jour, environ 275 ha de sols sont imperméabilisés dans l'UE (Montanarella & Panagos, 2015). Ce chiffre s'élève à 3,3 ha/jour en Wallonie alors que les surfaces imperméabilisées représentent déjà 7,5 % des surfaces wallonnes. La Belgique, avec une densité de population élevée de 377,5 habitants/km² (Portail Wallonie, 2023), est fortement sujette à cette problématique (Figure 4).

Ce phénomène affecte fortement le cycle de l'eau *via* la diminution du couvert végétal et l'imperméabilisation des surfaces accélérant le ruissellement, diminue drastiquement la biodiversité des sols notamment en bloquant les apports de matière organique (MO) et contribue à l'installation de microclimats caractérisés par une augmentation locale de température à l'intérieur de ce qu'on appelle des « îlots de chaleur urbains » (Aurba, 2015).

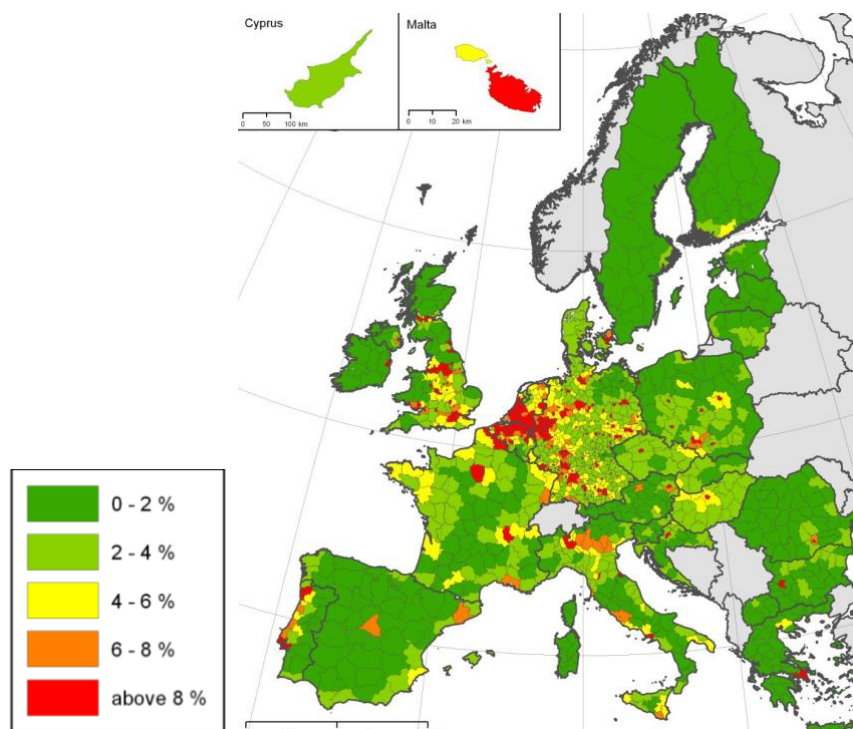


Figure 4 - Proportion d'imperméabilisation des sols en Europe (European Commission, 2006)

Mais la conversion des sols n'est pas uniquement liée à l'urbanisation. L'agriculture et la sylviculture entraînent des assemblages de végétation moins diversifiés avec la conversion en monoculture, ce qui a un impact négatif sur la santé des sols puisque cette conversion génère une réduction de la biodiversité et de la teneur en MO du sol.

- **L'érosion**

L'érosion est un processus en plusieurs étapes : (1) les particules de sol sont détachées par l'action du vent ou de l'eau ; (2) elles sont transportées *via* notamment l'action de la gravité ; (3) finalement, elles se déposent à un endroit différent. Ce processus naturel module la topographie du paysage et est provoqué par l'action du climat et du relief. Cependant, les processus anthropiques comme la déforestation, l'agriculture, l'artificialisation liée à l'urbanisation et la surexploitation de la végétation sont des causes de l'amplification de l'érosion du sol (European Commission, 2016).

L'érosion peut entraîner une diminution de la fertilité du sol *via* la perte de la couche supérieure du sol qui est souvent riche en nutriments et en MO. De plus, elle contribue à la pollution de l'eau en rendant le sol érodé plus imperméable, ce qui favorise le ruissellement rapide des contaminants chimiques vers les rivières, les lacs et les océans. Finalement, elle peut détruire ou altérer les habitats, entraînant la perte de biodiversité dans les écosystèmes terrestres.

- **La compaction des sols**

La compaction des sols correspond à la densification et la déformation du sol se produisant lorsque le sol est tassé de manière excessive via des pressions externes (European Commission, 2016). Cette compaction peut être naturelle avec l'impact des gouttes de pluies et le piétinement des animaux, mais elle est largement accélérée par l'activité humaine *via* l'agriculture, la foresterie, la construction ou d'autres activités nécessitant une machinerie lourde.

La compaction du sol entraîne une réduction de la porosité (dont la microporosité) du sol, c'est-à-dire de l'espace entre les particules solides, limitant le stockage de l'eau et la circulation de l'air. Par ailleurs, le volume habitable peut-être limité (notamment dans la microporosité), réduisant la biodiversité du sol et les fonctions associées comme la décomposition de la MO. La compaction du sol provoque aussi un ruissellement plus important des eaux de surface *via* l'imperméabilisation du sol.

- **Le changement climatique**

Le changement climatique dû aux activités humaines est une menace dont l'intensité ne fait que s'amplifier. Il modifie la température et l'humidité des sols ayant une influence sur les espèces qui y vivent. Il peut affecter la quantité de MO du sol essentielle pour sa fertilité puisque l'augmentation des températures peut accélérer la décomposition de la MO, réduisant ainsi sa teneur en carbone et sa capacité à retenir l'eau. De plus, le changement climatique entraîne des événements extrêmes plus fréquents et intenses, tels que les fortes pluies, les sécheresses et la montée des eaux, qui peuvent augmenter l'érosion des sols, réduire leur

fertilité et altérer leur structure, limitant ainsi leur capacité à stocker l'eau et à soutenir la croissance des plantes (European Commission, 2016).

- **La salinisation**

La salinisation est l'accumulation de sels solubles dans l'eau du sol. Selon le stade d'avancement, les conséquences peuvent, à des stades peu avancés, détériorer le métabolisme des organismes du sol et réduire la productivité du sol en interférant avec l'absorption de l'eau et des nutriments par les plantes. Cependant, à des stades avancés, ce phénomène élimine toute la végétation et transforme par conséquent les terres fertiles et productives en terres stériles (European Commission, 2016).

Les causes de salinisation peuvent être naturelles *via* l'accumulation à long terme de sels dans les profils de sol avec l'altération des roches par exemple ou *via* les submersions temporaires des sols dans l'eau de mer où le sel se dépose. Cependant, l'humain est aussi responsable de la salinisation des sols à cause de l'irrigation, le sel de déneigement, les activités minières, *etc.*

- **La contamination chimique**

Un contaminant est une substance susceptible de causer des dommages environnementaux, réversibles ou non, pouvant être nocif pour la santé (European Commission, 2016). Les pesticides, les éléments traces métalliques (arsenic, cadmium, chrome, *etc.*) et les plastiques sont tous des contaminants impactant le fonctionnement des sols. À titre d'exemple, les pesticides comme les insecticides sont une des causes de la perte de la biodiversité des sols, notamment des insectes et des vers de terre. La présence de plastique dans le sol peut quant à elle affecter négativement la structure du sol, réduisant la stabilité des agrégats du sol mais aussi affecter négativement la faune du sol (Lehmann et al., 2020).

- **Le déclin de la teneur en matière organique du sol**

La MO du sol est composée des organismes vivants du sol (vers de terre, insectes, algues, bactéries, nématodes, *etc.*) et des nombreux constituants plus ou moins fragmentés en cours de décomposition (feuilles mortes, cadavres, molécules organiques, *etc.*). La MO du sol favorise sa fertilité en libérant des éléments nutritifs (tel que l'azote) et en permettant leur rétention (rôle dans la capacité d'échange cationique). Par ailleurs, cette MO tient plusieurs rôles physiques, notamment dans la stabilité structurale contre l'érosion des sols à travers la formation des agrégats (associations entre matières organiques et minérales) ou dans la rétention de l'eau jouant sur la régulation de l'humidité du sol. Ainsi, ceci favorise la biodiversité du sol, outre l'apport de nouvelle source d'énergie apportée par la MO du sol (Wallonie Environnement, 2023).

Son déclin est provoqué par une série de facteurs, tels que la déforestation, le changement climatique, le drainage, la conversion de terres en cultures, l'utilisation de fertilisants qui accélère la minéralisation de la MO (European Commission, 2016).

- **Le déclin de la biodiversité**

La biodiversité des sols est la variabilité des organismes vivants dans le sol et les complexes écologiques dont ils font partie (Tibbett et al., 2020). Plus précisément, cela englobe des diversité à différentes échelles : la diversité des écosystèmes et des habitats, la diversité des espèces qui s'y trouvent, la diversité génétique au sein d'une ou de différentes populations d'une même espèce, la diversité phénotypique basée sur des critères physiologiques, *etc.* Les sols sont de grands réservoirs de biodiversité, ils contiennent au moins un quart à un tiers de tous les organismes vivants de la planète mais cette biodiversité est encore très mal connue.

Les êtres vivants du sol contribuent à la stabilité du sol *via* son aération qui lutte contre le ruissellement, réduisant le risque d'érosion et d'inondation. De plus, ces organismes du sol sont capables de dégrader certains polluants, ce qui empêche la prolifération de ravageurs nuisibles aux cultures, favorisant ainsi la santé des écosystèmes. Par ailleurs, ils sont capables de participer à la régulation du climat en stockant le carbone sous forme de carbone organique du sol. Ces organismes participent également au cycle des éléments nutritifs en recyclant la MO, la décomposant et la rendant ainsi disponible pour le développement des plantes.

Le déclin de la biodiversité des sols est provoqué par de multiples causes comme la compaction, l'érosion, l'utilisation de pesticides, *etc.* Ce déclin peut impacter de manière significative la capacité des sols à fonctionner normalement, à répondre aux perturbations mais également sur sa capacité de rétablissement.

2.2. Caractérisation de la santé des sols

Après avoir décrit les principales menaces qui pèsent sur le sol, il est utile de pouvoir évaluer la santé d'un sol à partir d'une caractérisation de plusieurs paramètres pédologiques. De manière générale, ces paramètres peuvent être classés comme étant physique, chimique ou biologique, même si les limites entre ces catégories peuvent parfois s'avérer fines.

La fréquence des paramètres utilisés dans le cadre d'étude scientifique est très hétérogène selon le paramètre (chimique, physique ou biologique) considéré (Figure 5). Le carbone organique total, le pH et le phosphore disponible sont les paramètres les plus utilisés dans l'étude du sol avec plus de 2/3 des études qui contiennent leur utilisation (Lehmann et al., 2020) et ce sont tous les trois des paramètres chimiques. Les paramètres physiques comme le stockage de l'eau, la densité apparente et la texture les suivent de près avec une fréquence d'utilisation supérieure à 40 %. Cependant, il apparaît que de manière générale, les paramètres biologiques sont beaucoup moins présents que les paramètres physiques et chimiques avec moins de 25 % d'apparition dans les revues scientifiques, bien qu'ils soient primordiaux dans l'évaluation de la santé du sol. Il a donc été choisi de s'intéresser attentivement à cette caractérisation biologique du sol dans le cadre de ce travail.

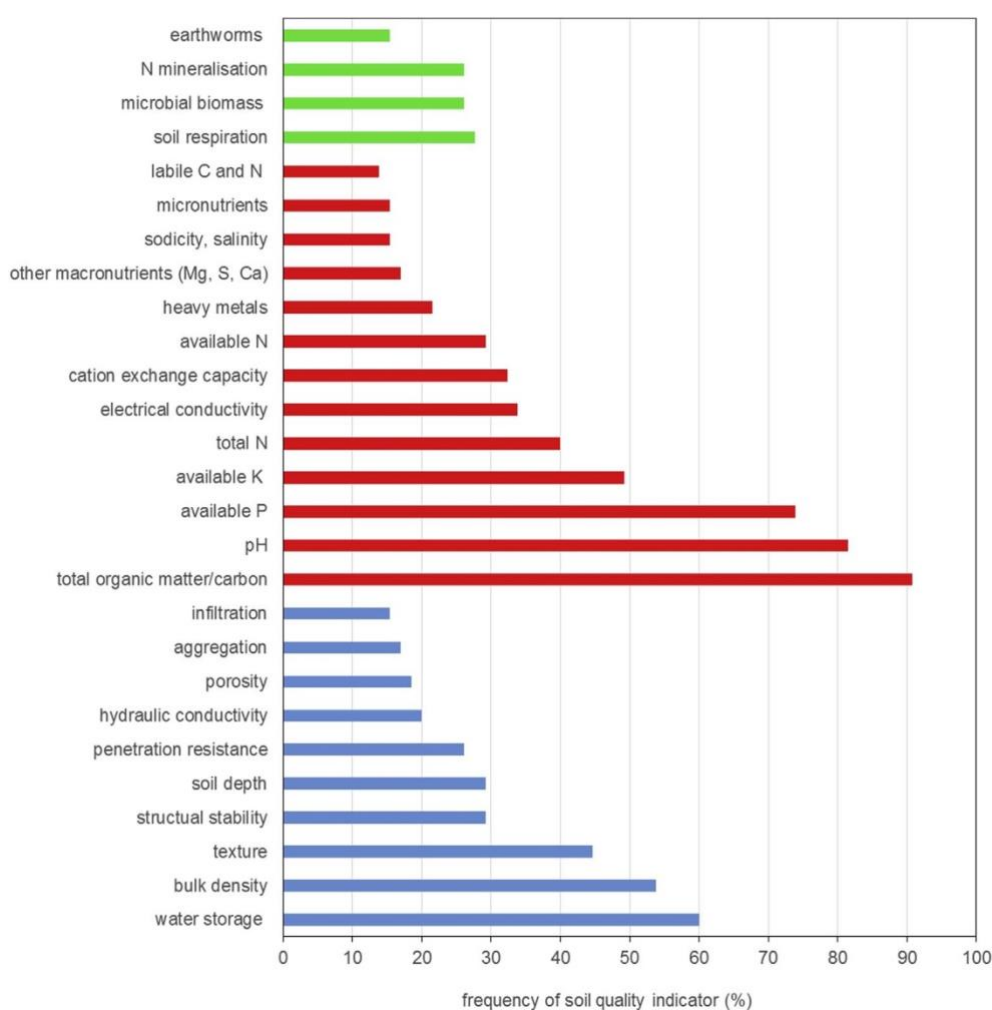


Figure 5. Fréquence des paramètres biologiques (vert), chimiques (rouge) et physiques (bleu) utilisés dans l'étude de la qualité des sols (Lehmann et al., 2020)

2.2.1. Caractérisation biologique

La caractérisation biologique peut permettre de renseigner indirectement sur le bon fonctionnement du sol. Par exemple, l'identification de la macrofaune permet de connaître l'influence des polluants ou de pratiques de gestion sur l'environnement. L'identification de l'activité microbienne peut quant à elle nous renseigner sur la capacité du sol à recycler la matière.

- **Vers de terre**

L'activité de la macrofaune du sol peut être étudiée notamment *via* la présence de vers de terre (VDT). Leur quantification est un indicateur très pertinent pour la caractérisation de la santé des sols puisque, de par leur activité, les VDT offrent de nombreux avantages (NSW, 2021). Tout d'abord, ils se nourrissent de débris végétaux (racines, feuilles mortes, *etc.*) et concentrent les matières organiques et minérales dans leurs déjections, comme le cas de l'azote, augmentant ainsi la disponibilité des nutriments pour les plantes. Ensuite, ils améliorent drastiquement l'aération du sol en creusant des galeries permettant aux racines des plantes de mieux se développer et favorisant l'activité microbienne puisque la MO est préalablement fragmentée. Cette aération du sol améliore également le drainage, qui est jusqu'à 10 fois supérieur à celui des sols sans VDT (NSW, 2021). Enfin, ils favorisent la formation d'agrégats, bénéfique à une structure du sol perméable, facilitant l'infiltration de l'eau dans le sol.

Il existe une centaine d'espèces de vers de terre. Pour faciliter leur étude, ils sont généralement regroupés en quatre groupes fonctionnels (Université de Rennes, 2023) : (1) les épigés vivent en surface dans les amas organiques, participent au fractionnement de la MO, ne creusent pas ou peu de galeries et sont de petite taille (1 à 5 cm) ; (2) les épi-anéciques à (têtes rouges) et (3) les anéciques (têtes noires) sont de grande taille (>10 cm) et se déplacent dans l'ensemble du profil de sol en creusant des galeries verticales permanentes, étant bénéfique pour l'infiltration de l'eau ; (4) les endogés creusent des galeries horizontales temporaires qui augmentent la capacité de rétention de l'eau, ils ne remontent pas ou peu à la surface et se nourrissent de la MO partiellement décomposée. Ces quatre groupes fonctionnels assurent des services agro-écologiques complémentaires afin de contribuer au fonctionnement des sols.

- **Activité microbienne**

L'activité microbienne fait référence à l'ensemble des processus métaboliques et biologiques qui sont réalisés par les microorganismes présents dans le sol, tels que les bactéries et les champignons. La population microbienne du sol constitue le maillon final de la chaîne trophique où transitent le carbone et les éléments nutritifs avant de redevenir disponibles pour les plantes (Chantigny and Angers, 2005). Les microorganismes occupent un rôle crucial pour les cycles des éléments nutritifs comme le carbone, l'azote et le phosphore. Ils sont responsables de la décomposition de la MO, ce qui permet la libération de nutriments essentiels pour la croissance des plantes. Par ailleurs, ils contribuent également à la régulation des maladies et à la dépollution des sols contaminés. De plus, l'activité microbienne contribue à la formation d'une structure de sol saine en participant à la formation d'agrégats du sol, qui améliorent la stabilité et la porosité du sol, favorisant une meilleure infiltration de l'eau (Vincent et al., 2022).

2.2.2. Caractérisation chimique

La caractérisation chimique a longtemps dominé et domine encore actuellement l'étude des sols car elle est fortement liée à la notion de fertilité et donc de production alimentaire en agriculture. Elle met donc principalement l'accent sur des éléments nutritifs majeurs (carbone, azote et CEC), mais aussi sur la présence d'éléments toxiques.

- pH

Le pH du sol dépend de plusieurs facteurs comme le matériau parental, la présence de végétation, l'usage du sol et la pluviométrie (Cornec, 2011). Cette variable régule la capacité des sols à stocker et à fournir des nutriments. Certains nutriments sont davantage disponibles en condition légèrement acide, alcalin ou neutre. Elle contribue ainsi de manière importante au contrôle de la productivité dans les écosystèmes terrestres *via* la croissance des plantes puisqu'elle régule la disponibilité en cations échangeables et régule également la faune et les microorganismes du sol qui préfèrent certaines valeurs de pH (Slessarev et al., 2016).

Le pH influence également d'autres processus biochimiques comme la décomposition de la MO, la nitrification, l'activité enzymatique, la biodégradation de polluants organiques, *etc.* (Figure 6) En effet, les microorganismes responsables de ces processus ont des préférences de pH. Par conséquent, des changements de pH peuvent avoir des conséquences sur les activités de ces microorganismes, et *in fine* avoir des répercussions sur les processus biogéochimiques du sol.

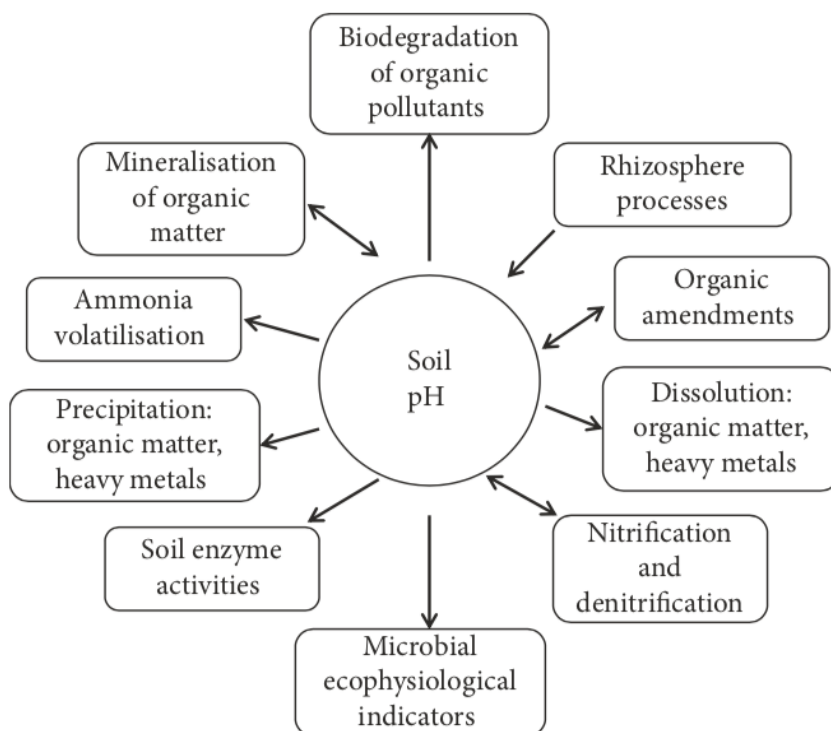


Figure 6 - Quelques processus biogéochimiques en lien avec le pH (Neina, 2019)

- **Carbone**

Le carbone organique du sol (CO), qui est compris dans la MO, comprend les constituants liés au vivant comme les restes de plantes et d'animaux à différents stades de décomposition ainsi que la biomasse microbienne et leurs sous-produits (Lal, 2016). Il est essentiel à la fertilité des sols puisqu'il améliore la structure du sol en favorisant l'agrégation des particules du sol, permettant une meilleure aération et une meilleure infiltration de l'eau. De plus, les microorganismes décomposent la MO en carbone pour obtenir de l'énergie, tout en libérant des nutriments pour les plantes. De manière générale, le CO crée des environnements dynamiques en stimulant les écosystèmes *via* notamment la croissance et le développement des plantes.

Le pool de CO du sol peut être une source ou un puits pour le stock atmosphérique selon l'utilisation et la gestion des terres. C'est une caractéristique très importante à prendre en compte vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique *via* la séquestration de carbone dans le sol. En effet, lorsque la MO se décompose dans le sol, elle stocke du carbone sous forme de matière non décomposée, limitant le relargage de CO₂ de l'atmosphère en le stockant dans le sol sur le long terme (Lal, 2007). S'il était possible d'augmenter globalement le pool de C du sol de 4 % à 3 m de profondeur, cela entraînerait une diminution du CO₂ atmosphérique de 240 Pg (1 Pg = 10¹⁵g = 1 milliard de tonnes), soit la quantité équivalente à la réduction de plus de 100 ppm de CO₂ (Lal, 2016).

Le carbone du sol se compose également du carbone inorganique du sol (CI). Le CI comprend les éléments n'étant pas lié au vivant (Lal, 2007) comme les carbonates. Bien que la formation de certains carbonates peut conduire à la séquestration du carbone atmosphérique puisqu'ils sont formés à l'aide d'une réaction incluant du CO₂, ce processus agit sur des échelles de temps très longues, faisant que le CIS n'est pas vraiment un levier d'action pertinent à utiliser contre le réchauffement climatique au contraire du COS.

- **Azote**

L'azote (N) est un élément nutritif essentiel à la croissance et au développement des plantes puisqu'il est nécessaire à la formation des protéines, stimule la croissance des feuilles, des tiges et des racines et joue un rôle vital dans la photosynthèse puisqu'il est un composant de la chlorophylle (Hofman and Cleemput, 2004). Tout comme le carbone, l'azote peut être présent sous deux formes : la forme majoritaire qui est organique avec les détritux végétaux ou animaux, les animaux du sol et les microorganismes ; et la forme minérale avec les différents composants comme les nitrites (NO₂⁻), les nitrates (NO₃⁻) et l'ammonium (NH₄⁺).

Vis-à-vis du compartiment sol-plante, il peut y avoir des gains en azote (décomposition, fixation microbienne, utilisation d'engrais à base d'azote, fumiers d'animaux, *etc.*) et des pertes en azote (volatilisation, lixiviation, dénitrification ; Hofman and Cleemput, 2004). En dehors des Fabaceae qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique, les plantes s'alimentent *via* l'azote du sol principalement sous la forme minérale (NH₄⁺ et de NO₃⁻ ; Hofman and Cleemput, 2004). C'est donc les formes d'azote disponible pour les plantes, c'est-à-dire minérales, qui nous intéressent principalement.

La minéralisation (Figure 7) est dictée par les microorganismes qui décomposent lentement les substances organiques du sol en NH_4^+ . L'immobilisation est l'incorporation de NO_3^- au sein de la biomasse microbienne, l'azote n'est alors plus disponible pour les plantes. La nitrification est en processus en deux étapes se déroulant en aérobie : les espèces *Nitrosomas* convertissent le NH_4^+ en NO_2^- ; ensuite, les espèces *Nitrobacter* convertissent le NO_2^- en NO_3^- . La dénitrification est un processus anaérobie pouvant être biologique ou chimique, le NO_3^- et le NO_2^- sont réduits en oxydes de N (NO , N_2O) et en diazote (N_2) par des micro-organismes, ces produits gazeux ne sont pas disponibles pour les plantes. La volatilisation est le processus par lequel le NH_3 du sol devient atmosphérique. Ce processus est dicté par l'équilibre $\text{NH}_4^+ / \text{NH}_3$ et l'équilibre liquide/gaz (Hofman and Cleemput, 2004).

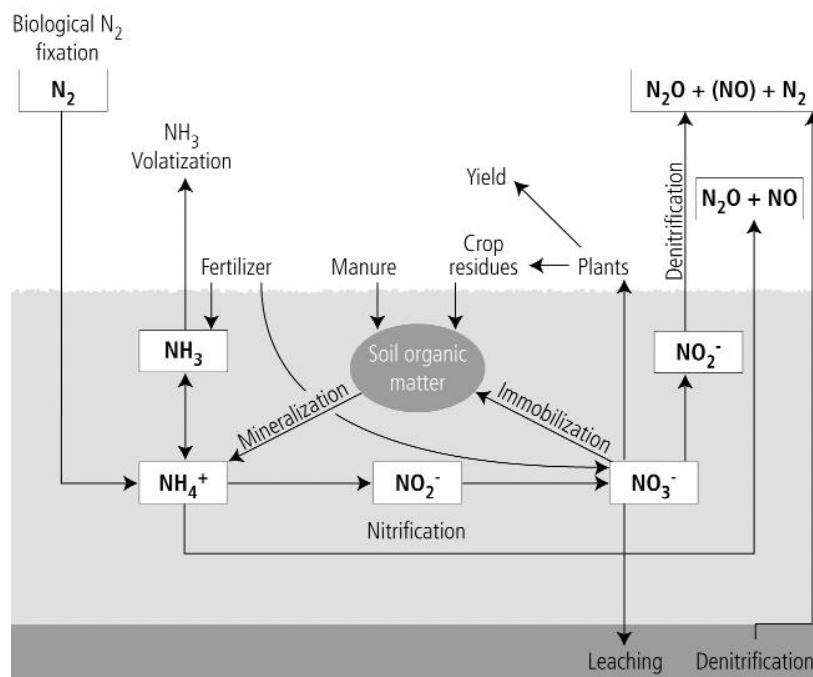


Figure 7 - Cycle de l'azote simplifié du système sol-plante (Hofman and Cleemput, 2004)

- **Rapport C/N**

Le rapport C/N, est un rapport de masse entre le carbone et l'azote du sol. Il permet d'observer l'évolution de la décomposition de la MO. Pour que cette MO soit humifiée, il est nécessaire que le rapport se situe entre certaines valeurs car les microorganismes du sol qui agissent directement pour décomposer la MO ont besoin de carbone comme source d'énergie et d'azote comme source de nutriments. Si l'un de ces éléments essentiels vient à manquer, les végétaux ne sont pas capables de se fournir suffisamment en nutriments et la minéralisation peut s'arrêter.

Selon la littérature (Terreom, 2022), un rapport C/N optimal entre 9 et 11 paraît être optimal et permet une activité microbienne efficace et un bon rapport entre l'humification et la minéralisation. Un rapport inférieur à 9 signifie un excès d'azote, la minéralisation est très rapide ce qui provoque un taux d'humus faible et une grande disponibilité en nutriments pour les plantes. Un rapport supérieur à 11 signifie que la décomposition peut être ralentie car les microorganismes manquent d'azote pour leur croissance et leur reproduction.

- **Capacité d'échange cationique**

La capacité d'échange cationique (CEC) d'un sol est la somme des cations qu'un sol est capable de retenir de manière réversible sur son complexe adsorbant à un pH donné (Bucaille, 2020). Elle est un indicateur de la fertilité des sols puisque ces ions positifs sont des éléments nutritifs pour les plantes. Il est généralement exprimé en cmol_c/kg. Ces surfaces d'adsorption sont présentes principalement sur les argiles minéralogiques et les matières organiques.

Les ions présents sur les sites d'adsorption sont le calcium (Ca²⁺), le magnésium (Mg²⁺), le potassium (K⁺) et le sodium (Na⁺), qui composent les « cations échangeables » ainsi que l'hydrogène (H⁺) et l'aluminium (Al³⁺) qui forment quant à eux « l'acidité d'échange ». Les ions alcalins sont plus intéressants pour la fertilité que les ions d'acidité d'échange puisqu'ils sont plus nutritif pour les plantes. La proportion de la CEC occupée par les cations échangeables est appelé le taux de saturation et permet d'évaluer l'équilibre des cations dans le sol.

- **Éléments majeurs**

Les éléments majeurs, ou macroéléments, sont des éléments chimiques nécessaires en quantités suffisantes pour subvenir au développement et à la croissance de tous les organismes. Les macroéléments incluent le carbone (C), l'hydrogène (H), l'azote (N), l'oxygène (O) le calcium (Ca), le potassium (K), le phosphore (P), le magnésium (Mg), le sodium (Na).

Pour les plantes : le phosphore intervient dans le mécanisme de la photosynthèse et la synthèse d'enzyme et de protéines ; le potassium est un des constituants des cellules végétales ; le calcium constitue les parois cellulaires et participe à la formation du noyau cellulaire ; le soufre et le magnésium sont des constituants essentiels à la chlorophylle (Ontario, 2023). Des déficiences en éléments majeurs dans les sols peuvent provoqués des déficiences chez les plantes, et par la suite avoir des conséquences sur la santé humaine. Ces éléments interviennent dans différentes fonctions comme dans la régulation de l'ATP grâce au potassium et au sodium ou à la contraction musculaire et à la composition des os avec le calcium (Berdanier et al., 2016).

- **Éléments traces**

Les éléments traces sont des éléments dont les teneurs sont relativement faibles dans les systèmes. Les éléments sont considérés comme « trace » lorsqu'ils sont présents dans le système à des niveaux inférieurs à 0,1 % ou lorsqu'il est couramment présent dans les tissus végétaux ou animaux à une teneurs inférieure à 0,01 % de l'organisme (Senesil et al., 1999). Mais de manière générale, les éléments traces se trouvent naturellement dans le sol et certains sont nécessaires à de nombreux mécanismes naturels. Par exemple, le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cuivre (Cu), le cadmium (Cd) et le zinc (Zn) sont tous considérés comme des éléments traces.

Lorsqu'ils sont présents à des teneurs trop importantes à cause des voies anthropiques, ils deviennent dangereux pour l'écosystème et pour la santé humaine. Par exemple, l'utilisation excessive de pesticides contenant des éléments traces peut entraîner leur accumulation dans le sol.

Beaucoup d'éléments traces ont une utilité dans les processus biologiques. Par exemple, le zinc est impliqué dans la synthèse des protéines et des enzymes. Cependant, ils peuvent être bio-accumulés dans les plantes et induire des problèmes de croissance, de reproduction, de photosynthèse, *etc.* De plus, ces éléments peuvent altérer l'absorption de nutriments car leur présence, par effet de compétition, diminue l'absorption des nutriments essentiels au développement des plantes et provoquer des carences (Cheng, 2003). Certains éléments traces comme le plomb ou le mercure n'ont aucune fonction connue pour l'organisme, et sont considérés comme toxiques.

2.2.3. Caractérisation physique

Bien que moins présente que la caractérisation chimique, la caractérisation physique joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la santé des sols. La granulométrie, la structure du sol et la densité apparente sont étroitement liées à la capacité du sol à fournir des fonctions essentielles telles que la rétention et la circulation de l'eau, l'aération, le stockage des nutriments, la résistance à l'érosion et le support des racines des plantes.

- **Granulométrie**

La granulométrie est une mesure de la taille et la répartition des particules solides du sol (Veritas, 2023). Elle est exprimée généralement en pourcentage de la masse totale ou du volume total des particules dans chaque classe de taille. Les trois classes principales considérées sont les sables ($> 50 \mu\text{m}$), les limons (entre 2 et $50 \mu\text{m}$) et les argiles ($< 2 \mu\text{m}$).

La distribution de la taille des particules a une influence directe sur une série de fonctions. Par exemple, le stockage de l'eau dépend de la granulométrie puisque cette dernière influence la taille des pores du sol. Un sol argileux aura davantage tendance à avoir une rétention d'eau importante, à fixer davantage les cations/anions sur des sites d'échanges et s'associent davantage aux matières organiques humifiées (Baize Denis, 2018). Au contraire, les particules de diamètre supérieure comme les sables favorisent la perméabilité à l'eau et sont propices à une meilleure aération du sol pouvant être bénéfique à une plus grande activité biologique (Capinov, 2023).

- **Structure**

La structure du sol est le mode d'assemblage des particules de sol (sables, limons, argiles) entre elles. Ces particules, une fois assemblée, forme ce qu'on appelle des agrégats (FAO, 2023). Ces agrégats sont formés par l'interaction complexe entre les particules minérales, la MO du sol, l'eau, l'activité biologique et les processus chimiques. Ce paramètre dicte les processus de transport de l'eau et de l'air car ceux-ci sont en lien direct avec la structure et la taille des pores (Vogel et al., 2010). De plus, la structure du sol dicte également les processus biologiques puisque les pores sont les espaces de vie pour la biodiversité du sol qui dépend aussi de la disponibilité de l'eau.

Un sol compact a un faible taux d'infiltration d'eau. Au contraire, un sol moins compact peut permettre une prise d'eau plus rapide, un drainage plus important, une activité microbienne et

une décomposition plus bénéfique, *etc.* (McCalla, 2023) La structure peut également indiquer l'intensité de la présence d'une activité microbienne ou de la macrofaune du sol. En effet, l'activité animale a tendance à améliorer la structure du sol *via* l'aération et l'augmentation de la taille des pores.

- **Stockage de l'eau**

Le stockage de l'eau est la capacité du sol à conserver l'eau dans ses pores pour une utilisation ultérieure par les plantes et d'autres organismes du sol. Il dépend notamment de la structure et de la granulométrie du sol décrits juste ci-dessus mais aussi de la MO qui est favorable à la rétention d'eau (European Environment Agency, 2015).

Dans le contexte du changement climatique, les événements extrêmes comme les inondations et les sécheresses vont être plus fréquents. La capacité du sol à stocker l'eau est un tampon majeur contre ces événements. Le maintien voir l'amélioration de la capacité des sols à retenir l'eau peut donc jouer un rôle positif dans l'atténuation des impacts d'intensités pluviométriques extrêmes et de sécheresses plus fréquentes et plus sévères (European Environment Agency, 2015).

2.3. Indices de santé des sols

Il a été proposé de développer des indices de la santé des sols. Ceux-ci permettent de « quantifier » la santé de sol, et de pouvoir la comparer avec d'autres sols. Ils prennent en compte plusieurs paramètres comme le pH, la CEC, l'activité microbienne et la structure afin de donner un « score » unique sur la santé du sol. Cependant, notons que peu d'études incluent l'utilisation d'indices de santé des sols (Lehmann et al., 2020).

Le développement d'un indice requiert une transformation quantitative et une pondération de plusieurs paramètres selon leur importance qui est très difficilement quantifiable. En effet, Les valeurs des paramètres sont nécessairement transformées à l'aide de relations non linéaires, car une valeur plus élevée n'indique pas toujours un meilleur sol. Notons que la plupart du temps, les paramètres sont traités avec une importance égale. De plus, les comparaisons entre sol de différentes régions sont parfois inappropriées puisque ceux-ci ont parfois des différences inhérentes, nécessitant un étalonnage minutieux selon les conditions environnementales en question. Néanmoins, ces indices peuvent être très utiles à comparer pour un même sol à des périodes différentes, ce qui se rapportent à la « capacité continue » d'un sol en bonne santé.

La proportion de l'utilisation des paramètres biologiques sont généralement plus faible que l'utilisation des paramètres physiques et chimiques (Figure 8), reflétant probablement l'accent historique de l'utilisation de paramètres visant à évaluer la fertilité plutôt que la santé des sols afin d'étudier la croissance et la productivité des cultures. De plus, les paramètres biologiques comme l'activité microbienne ou la biomasse microbienne sont généralement plus difficiles à mesurer. Cependant, l'utilisation de ces paramètres est croissante puisque l'importance de la présence d'organismes dans le sol est de plus en plus reconnue et joue de multiples rôles pour la fertilité des sols ou pour la stabilité du sol par exemple.

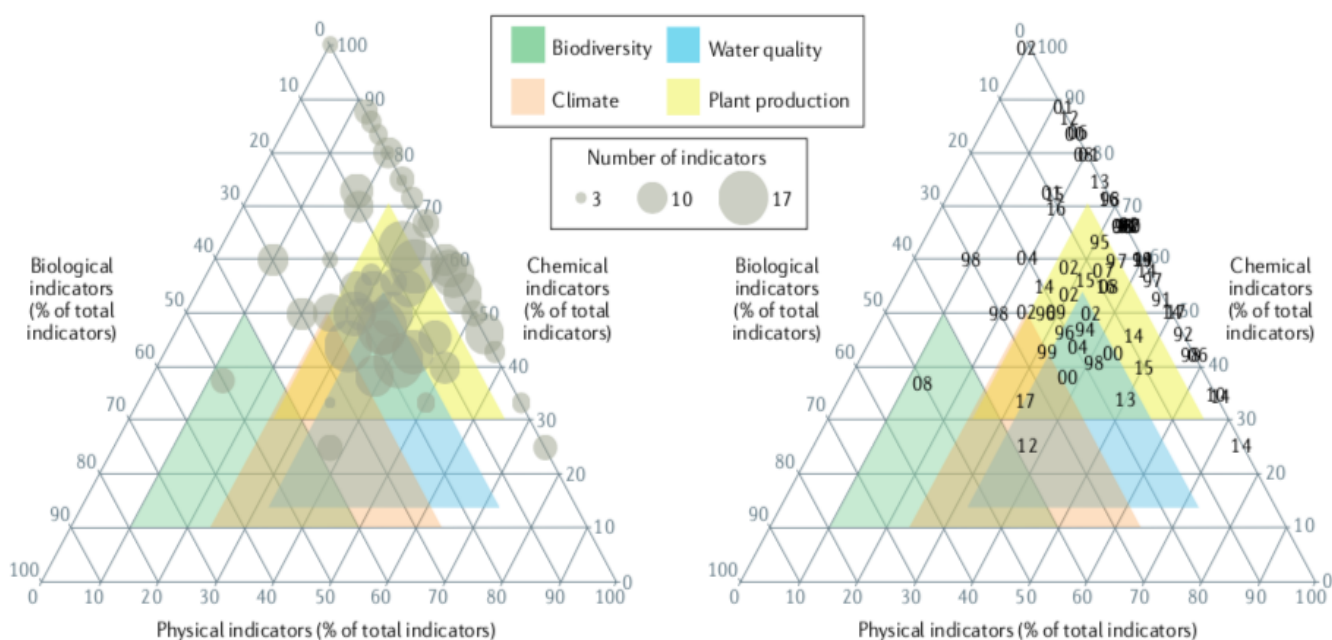


Figure 8 - Paramètres biologiques, physiques, chimiques inclus dans les indices de la santé des sols (Lehmann et al., 2020). Le panneau de gauche montre le nombre d'indicateurs et la proportion de chaque type (biologique, chimique ou physique). Chaque cercle représente un schéma d'évaluation et la taille du cercle représente le nombre d'indicateurs dans le schéma. Le panneau de droite montre l'année de chaque programme d'évaluation de la santé des sols à partir du panneau de gauche.

À titre d'exemple, l'indice Biofunctool, développé par le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement en France (CIRAD, 2023), inclut cette dimension biologique en prenant davantage en compte le rôle des organismes du sol. Cette méthode intègre neuf indicateurs de terrain afin d'évaluer trois fonctions : la dynamique du carbone, le cycle des nutriments et le maintien de la structure du sol. L'indice est construit afin de synthétiser la santé du sol, plus son score est élevé, plus la qualité biologique du sol est considérée comme bonne.

Un autre exemple d'indice de santé des sols est l'Indice de Biodiversité du Sol (IBS), également connu sous le nom d'Indice de Qualité Biologique du Sol (Institut de recherche pour le Développement (IRD), 2023). L'IBS se base sur la mesure de la diversité biologique du sol, notamment la biodiversité des micro-organismes tels que les bactéries, les champignons et les protozoaires, ainsi que celle des petits animaux tels que les vers de terre, les collemboles et les acariens. L'IBS attribue des scores aux différents groupes biologiques en fonction de leur diversité et de leur abondance dans le sol.

3. Objectifs

La qualité de l'environnement (l'eau, le sol, l'air et la biodiversité) du campus de Louvain-la-Neuve est l'une des priorités du Plan Transition lancé par l'UCLouvain en 2021. L'évaluation de la santé des sols urbains permet de quantifier l'influence de l'artificialisation lié à l'urbanisation de Louvain-la-Neuve et de son université sur la biodiversité et les fonctions écosystémiques des sols.

L'objectif principal de ce mémoire est donc de faire un état des lieux de la santé générale des sols à Louvain-la-Neuve pour, *in fine*, proposer de potentielles solutions visant à améliorer leur santé et les services écosystémiques qu'ils fournissent.

Ainsi, la question de recherche proposée est :

Quel est l'état de la santé des sols urbains sur le campus de Louvain-la-Neuve ?

Pour répondre à cette question, il est nécessaire, dans un premier temps, de sélectionner des sites d'études suffisamment contrastés pour représenter l'ensemble des types d'environnements de Louvain-la-Neuve (utilisation du sol et proportion de zones artificialisées aux alentours du site).

Les échantillons de sols collectés selon un protocole précis sont ensuite caractérisés en analysant des paramètres physiques, chimiques et biologiques. L'ensemble de ces paramètres permet d'évaluer la santé des sols en comparant les types d'environnements précédemment choisis afin de proposer de potentielles solutions pour améliorer leur santé.

4. Matériel et méthode

4.1. Sites d'étude

4.1.1. Contexte environnemental du périmètre d'étude

La zone d'étude est située dans la commune d'Ottignies-Louvain-la-Neuve (Brabant wallon, Belgique), et plus précisément, dans et autour du campus de l'UCLouvain. Le climat est tempéré océanique, c'est-à-dire caractérisé par des étés doux et des hivers sont frais. La température annuelle moyenne est de 10,6 °C et les précipitations moyennes sont de 850 mm·an⁻¹ (IRM, 2022).

La ville urbaine de Louvain-la-Neuve a été bâtie dans les années 1970 avec l'objectif d'accueillir l'UCLouvain. Sa superficie totale est d'environ 1 000 ha. Le bois de Lauzelle couvre 198 hectares et les espaces verts occupent 168 ha dans la ville. Celle-ci accueille une population diurne de 45 000 personnes et une population nocturne de 21 000 personnes. La circulation se fait principalement par transport doux puisque la cité peut compter sur une dalle piétonne de 14,5 hectares. Un réseau sous-terrain de circulation automobile est présent pour les déplacements en voiture (Tourisme oln, 2023).

4.1.2. Choix des sites d'étude

Un total de **dix sites d'études** est sélectionné dans la zone urbaine de Louvain-la-Neuve (Tableau 2). Les sites sont choisis afin de représenter au mieux la santé contrastée des sols urbains divers présents dans la ville en étant répartis de manière la plus équitable possible spatialement dans le champ d'étude (Figure 9), et avec des caractéristiques contrastées (degrés d'artificialisation et usages du sol différents).

Tout d'abord, un site témoin est sélectionné à la ferme de Lauzelle (Figure 10). Ce dernier est situé sur une parcelle agricole représentatif de l'état initial des sols de Louvain-la-Neuve puisque les champs et les prairies couvraient le paysage avant la construction de la ville. L'objectif du site témoin est d'avoir une idée de la santé du sol avant l'urbanisation du territoire. Ensuite, des parcs sont choisis (Figure 11) ainsi que des zones plus artificialisées (Figure 12).

Tableau 2- Localisation et usage des sites d'étude de Louvain-la-Neuve

Nom du site	Usage	Latitude [°N]	Longitude [°E]
Parcelle Témoin	Agricole	50,6770	4,6105
Parc à Lapin	Parc récréatif	50,6641	4,6165
Parc des Bruyères (Aldi)	Parc récréatif	50,6630	4,6117
Jardin de Moulinsart	Parc récréatif	50,6608	4,6080
Parc de la Baraque	Parc résidentiel	50,6709	4,6233
Parking Sainte-Barbe	Parking	50,6679	4,6216
Parking de l'Ephec	Parking	50,6664	4,6125
Blocry	Zone piétonne	50,6705	4,6045
Pompe Q8	Aire de pique-nique	50,6676	4,6256
Pompe Total	Terrain vague	50,6724	4,6184

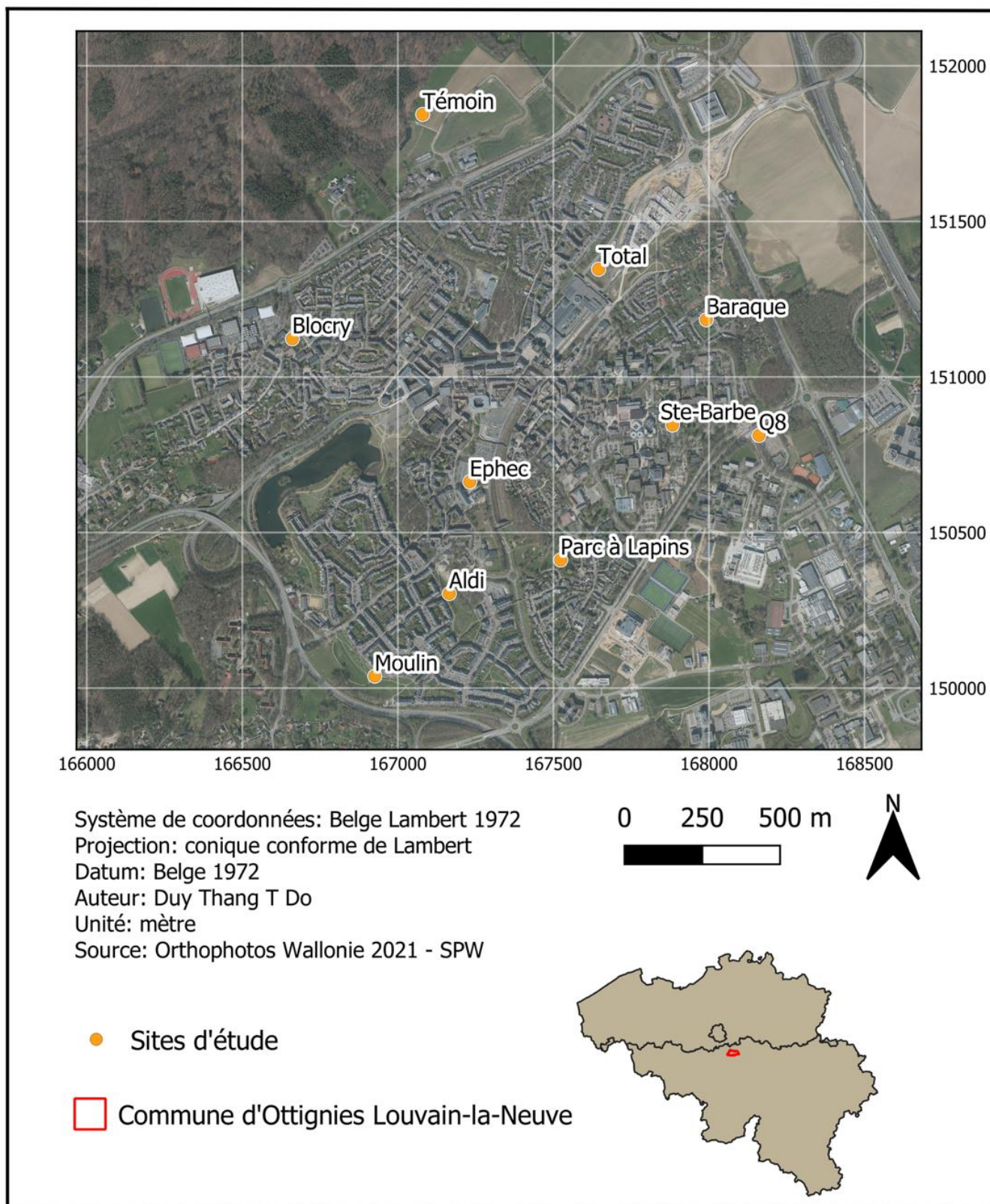


Figure 9 - Localisation des sites d'études de Louvain-la-Neuve



Figure 10 - Parcelle témoin à Louvain-la-Neuve



Figure 11 – Exemple d'un parc (Parc à lapins) à Louvain-la-Neuve



Figure 12 – Exemple d'un site artificialisé (Parking Sainte-Barbe) à Louvain-la-Neuve

4.2. Méthodologie d'échantillonnage

• Échantillonnage sur le terrain

Afin d'obtenir des échantillons les plus représentatifs possibles des sites choisis, une méthodologie bien précise est utilisée

Figure 13). Dans chaque site, trois zones (A, B et C) aussi homogènes que possible (distance à un arbre, distance à une surface bétonnée, etc.) sont choisis. Ils sont espacés d'au moins une dizaine de mètres et disposés en ligne ou en triangle selon l'espace disponible. Cette approche permet d'obtenir trois réplicats pour chaque donnée, assurant une meilleure fiabilité et une meilleure représentativité des résultats.

Au sein d'une zone, six échantillons de sols situés à égale distance aux extrémités du cercle principale de 1 m de rayon sont prélevés à l'aide d'une tarière, à 30 cm de profondeur (si le sol le permet) en novembre 2022. Ces échantillons sont ensuite mélangés dans un seau afin d'obtenir un échantillon homogène. La terre homogène est ensuite divisée en deux parties dans des sacs d'échantillonnage en plastique : (1) une fraction de 100 g environ pour les analyses réalisées sur la matière fraîche et conservée à 4 °C ; et (2) une fraction de 500 g environ pour les analyses sur la matière sèche après séchage à plus de 25 °C pendant une à deux semaines.

Trois analyses sont réalisées *in situ*. L'analyse de l'activité microbienne via le Tea Bag Index est réalisée à l'extrémité du cercle secondaire de 0,5 m de rayon à l'aide de trois sachets de thé verts et trois sachets de thé rouges. De plus, un test à la bêche pour l'évaluation des VDT est réalisé au centre de chaque site. Les blocs de sol issus de ce test à la bêche sont utilisés pour l'évaluation visuelle de la structure du sol.

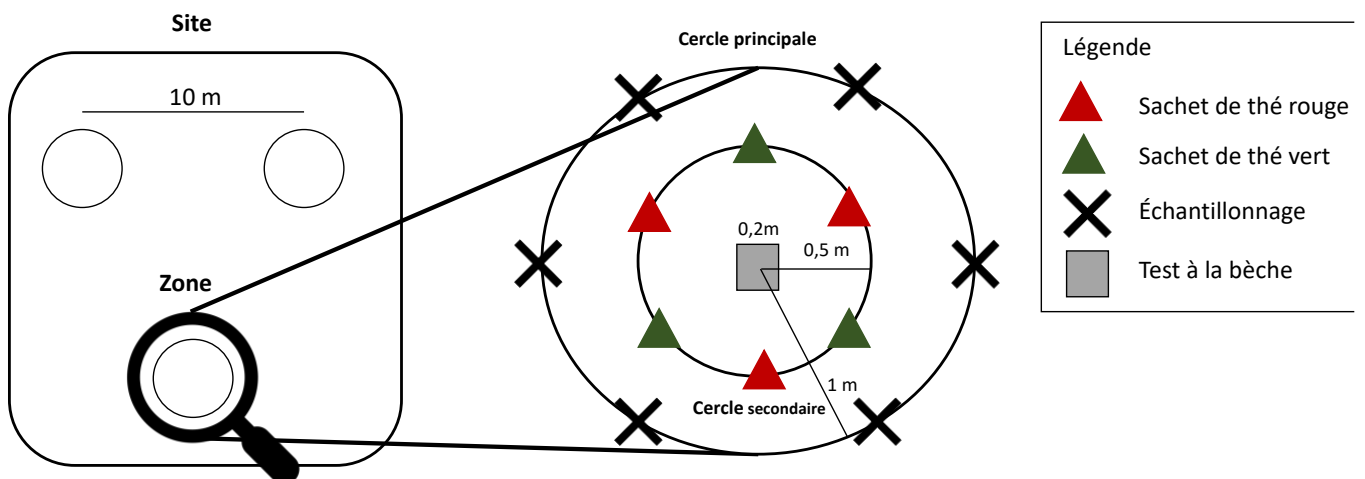


Figure 13 – Méthodologie d'échantillonnage sur le terrain

- **Préparation des échantillons**

Pour les analyses de la fraction de sol sec, les manipulations sont réalisées en veillant à minimiser le risque de contamination croisée à l'aide de nettoyage du matériel (tarière, bêche, couteau) entre chaque échantillon.

Les trente échantillons de sols sont séchés durant deux semaines. Ils sont homogénéisés par mélanges successifs. Les agrégats sont réduits avec l'utilisation d'une bouteille en verre, en veillant à ne pas broyer les éléments grossiers peu cohérents. Les sols sont tamisés à 2 mm puis, pour chaque échantillon, quelques grammes de la fraction fine (<2 mm) sont broyés à l'aide d'un broyeur à sol (Retsch® Vibratory Disc Mill RS 200) dont le programme est fixé à 30 secondes pour 700 rpm (rotations par minute). Le sol broyé est placé dans un tube d'échantillonnage en plastique labélisé.

Les différentes analyses réalisées sont faites sur des fractions spécifiques selon le protocole

Figure 14) : échantillon frais pour les formes d'azote minérales ; échantillon sec tamisé pour le pH, la CEC et la granulométrie ; échantillon sec broyé pour le contenu en carbone, en azote et en éléments traces.

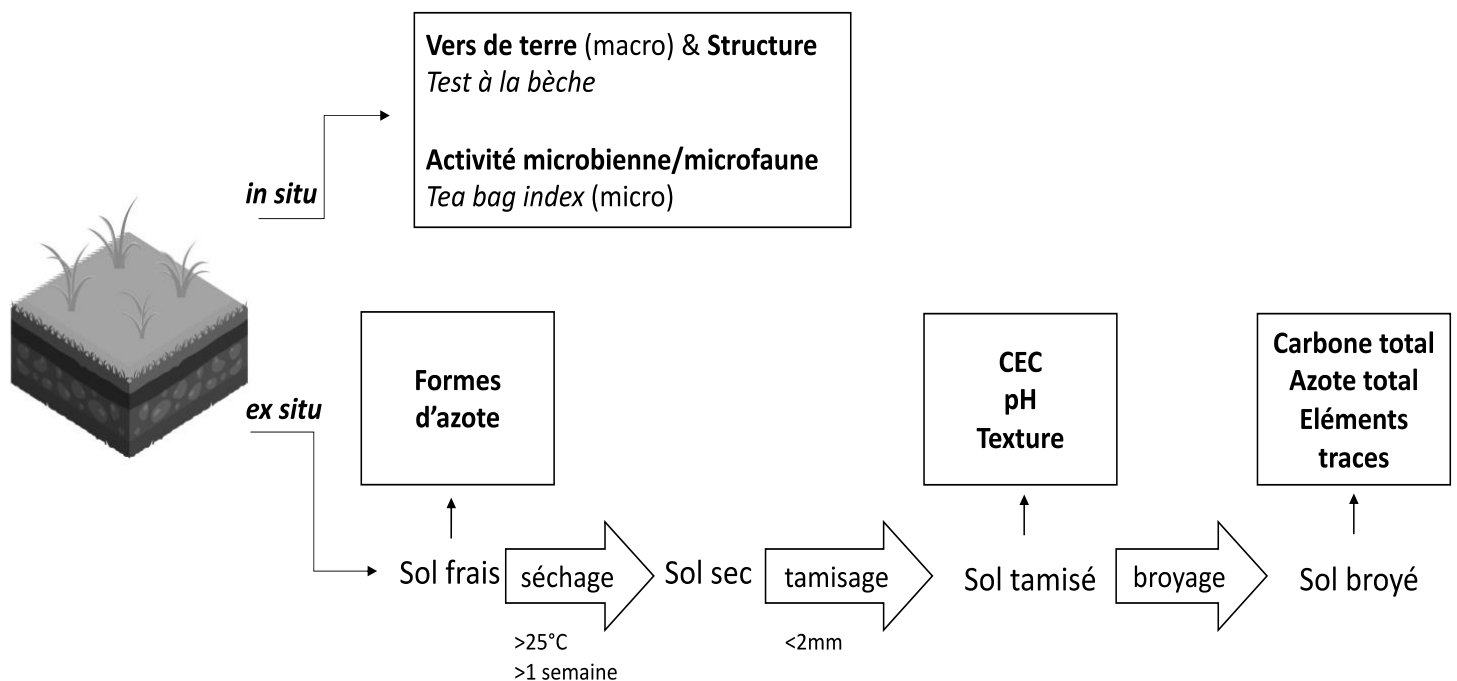


Figure 14 - Méthodologie générale des caractérisations du sol

4.3. Caractérisation chimique

4.3.1. pH_{eau}

Les mesures de pH sont réalisées sur les échantillons de sols secs tamisés. Environ 5 g de sol sont pesés à l'aide d'une balance (précision de 0,01 g) et placés dans des piluliers de 40 mL. Ensuite, 20 mL d'eau milli-Q (i.e. eau ultra-pure traitée pour éliminer les impuretés telles que les sels et les minéraux) y sont ajoutés pour échanger les ions H^+ . La solution est agitée toutes les 20 minutes pendant une heure (3 mélanges au total). Le pH-mètre (WTW InoLab® pH 720) préalablement calibré permet de réaliser les mesures qui se réalisent une heure après la dernière agitation. La sonde est rincée à l'eau déminéralisée et délicatement séchée entre chaque échantillon. Une fois la valeur stabilisée, le résultat est obtenu.

4.3.2. Capacité d'échange cationique

- Préparation des échantillons

Les mesures de la CEC sont réalisées à l'aide des échantillons de sol sec tamisés à 2 mm. La CEC du sol est déterminée en saturant le sol par une solution mono-ionique d'échange afin de déplacer les cations alcalins et alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) qui peuvent être dosés. Ensuite, l'excès de sel est lavé par un solvant, le cation saturant est désorbé par un autre sel et peut être récolté et dosé pour déterminer la CEC potentielle du sol (Figure 15). La méthode utilisée est celle de Metson qui utilise l'acétate d'ammonium 1M à pH 7 comme solution d'échange.

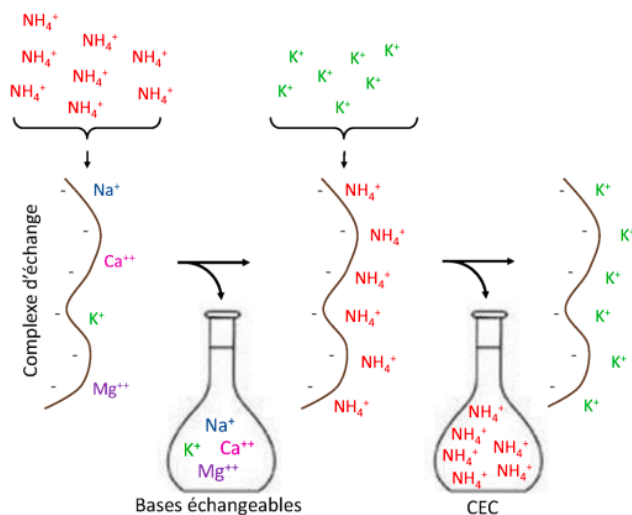


Figure 15 - Schéma de principe de la détermination de la CEC

La

Figure 16 montre la construction des colonnes de percolation en suivant l'ordre : de l'ouate, 5 g de sable propre, un mélange de 5 g de sol et de 20 g de sable propre, suivi de 5 g de sable propre. Deux colonnes supplémentaires (blanc) sont réalisées où le mélange sol/sable est remplacé par 10 g de sable propre afin de déterminer la quantité de cations échangeables qui pourrait provenir du sable ou de la ouate et non du sol.

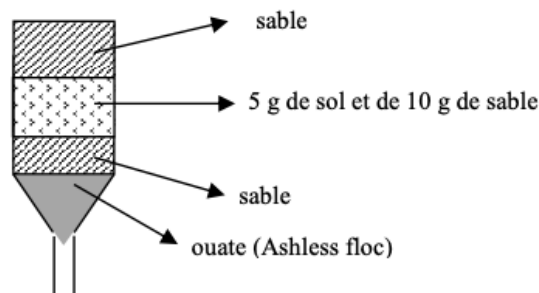


Figure 16 - Construction des colonnes d'expérimentation

Une solution d'acétate d'ammonium est utilisée pour percoler 6 fois (25 mL) les colonnes préparées. Les percolats sont récoltés dans des ballons jaugés de 250 mL et portés au volume à l'aide d'eau mQ, le ballon jaugé est bien mélangé et la solution est collectée dans des piluliers de 100 mL. Ces premiers piluliers sont utilisés pour l'analyse des cations échangeables. Ensuite, les colonnes sont lavées 6 fois avec 50 mL d'éthanol dénaturé et le percolat est jeté. Enfin, une solution de KCl est utilisée pour percoler 6 fois (25 mL) les colonnes lavées et les percolats sont récoltés de la même manière qu'avec l'acétate d'ammonium. Ces piluliers sont utilisés pour l'analyse de la CEC.

- Analyse des échantillons

Pour l'analyse des cations échangeables, des droites de calibration sont construites à l'aide de standards qui sont des échantillons de concentrations connues pour chaque cation échangeable. Les solutions sont ensuite analysées via un spectromètre (ICP-AES Thermo Scientific ICAP 6500) qui excite les atomes contenus dans la solution. Le spectromètre mesure la lumière émise par les atomes excités de l'échantillon dont la longueur d'onde est caractéristique.

Pour l'analyse de la CEC, la méthode de l'absorbance est utilisée grâce à 0,1 g de chaque sol qui sont dilués 50 fois avec de l'eau mQ. Plusieurs réactifs spécifiques du kit Spectroquant® sont ajoutés à tour de rôle dans les échantillons afin de réagir avec l'ammonium. Les échantillons préparés sont placés dans un photomètre qui va mesurer l'absorbance de l'échantillon. En parallèle de ces mesures et de la même manière que pour les cations échangeables, des standards sont construits pour calibrer les mesures, et ceci afin de pouvoir établir une relation entre la quantité de NH_4^+ présent et l'absorbance grâce à une droite d'étalonnage. L'équation de la droite permet ensuite d'obtenir la concentration en NH_4^+ de tous les échantillons de sol avec y = l'absorbance et x = la concentration en NH_4^+ . Ces concentrations sont ensuite converties en CEC [$\text{cmol}_c/\text{kg}_{\text{sol}}$] via la formule suivante :

$$CEC = \frac{C_{\text{NH}_4} * F * 0,25 * 100}{m_{\text{échantillon}} * M_{\text{NH}_4}}$$

Avec F le facteur de dilution égal à 50, 0,25 L le volume d'échantillon avant analyse, 100 un facteur de conversion d'unité, $m_{\text{échantillon}}$ égal à 0,1 g et $M_{\text{NH}_4} = 18,04 \text{ g/mol}$.

4.3.3. Carbone total et azote total

Les mesures de carbone total et d'azote total sont réalisées sur les échantillons de sol sec broyés. Une feuille en étain est placée dans une balance de précision (0,01 mg de précision). Entre 15 et 20 mg de sol sont placés dans la feuille. Le tout est fermé sur lui-même de sorte à ce que le contenant ne contienne plus d'air (l'air pouvant fausser les résultats en piégeant le dioxyde de carbone ou le diazote atmosphérique dans l'échantillon). Lorsqu'une fuite est constatée, l'opération doit être recommencée. Deux réplicats par sol sont réalisés, donnant au total 60 échantillons pesés.

Les échantillons sont analysés par un analyseur élémentaire CHNS (Elementar vario EL cube®). Ce dernier utilise une méthode de combustion pour déterminer les teneurs de carbone total et d'azote total des échantillons mesurés. Le sol est brûlé à haute température en présence d'oxygène pour transformer le carbone et l'azote en CO₂ et en N₂. Ces gaz sont ensuite mesurés et les quantités de carbone et d'azote sont déterminées en fonction de la quantité de gaz générée.

Les mesures sont réalisées sur les échantillons de sol tamisés. Cependant, bien qu'ils aient été mis dans une salle de séchage, ils contiennent tout de même un reste d'humidité qui peut entraîner une dilution des éléments en question, faussant ainsi les données obtenues. Par conséquent, pour compenser cet effet, un pourcentage de matière sèche de chaque échantillon initial est calculé. Des creusets sont annotés et pesés sur des balances de 0,001 g de précision. Ceux-ci sont mis dans une étuve à 105°C pendant au moins 2 heures. Les creusets sont refroidis dans des dessiccateurs permettant de les préserver de l'humidité. Entre 0,8 et 1 g de sol des sites tamisés à 2 mm sont ajoutés et ils sont remis à l'étuve pour une durée d'au moins une nuit. Les creusets sont refroidis de la même manière et pesés immédiatement. La différence de masse indique la quantité d'eau présente dans l'échantillon initial.

$$\text{Matière sèche [\%]} = 100 * \frac{\text{Masse}_{\text{initial}}[\text{g}] - \text{Masse}_{\text{eau}}[\text{g}]}{\text{Masse}_{\text{initial}}[\text{g}]}$$

Finalement, cette correction permet de normaliser les données pour une base de matière sèche et d'éliminer l'effet de l'humidité qui peut varier en fonction de l'échantillon.

$$\begin{aligned}\text{Carbone}_{\text{corrigé}}[\%] &= \frac{\text{Carbone}_{\text{initial}}[\%]}{\text{Matière sèche}[\%]} \\ \text{Azote}_{\text{corrigé}}[\%] &= \frac{\text{Azote}_{\text{initial}}[\%]}{\text{Matière sèche}[\%]}\end{aligned}$$

Pour estimer qualitativement la présence de carbonates dans le carbone total, le test à l'acide chlorhydrique (HCl) est utilisé sur les échantillons dont le pH est alcalin. Une solution 1 M de HCl est appliquée sur quelques grammes de sol tamisé. La réaction entre la solution et le sol carbonaté provoque une effervescence qui est proportionnelle à la concentration en carbonates.

4.3.4. Matière organique

L'analyse du taux de MO des sols s'effectuent sur les échantillons de sols broyés, qui ont été préalablement chauffé à 105 °C lors de l'analyse de la matière sèche (voir 4.3.3). L'objectif est de réaliser une différence de masse entre le sol initial et l'échantillon chauffé à 550 °C et à 1000 °C (Pansu and Gautheyrou, 2006). Les 30 creusets sont placés dans un four Carbolite Gero® à 550 °C pendant au moins une nuit. Après cette période, ils sont placés quelques minutes dans un dessiccateur pour préserver les échantillons de l'humidité ambiante le temps qu'ils refroidissent. Les différences de masse sont calculées. L'opération est répétée pour une température de 1000 °C dans le four en veillant à attendre que les échantillons refroidissent suffisamment avant de les manipuler et de les reposer. La perte au feu à 550 °C est un indicateur de la MO, alors que la perte au feu à 1000 °C indique la MO ainsi que la combustion des carbonates (Heiri et al., 2001).

$$Pertes_{550^{\circ}C}[\%] = 100 * \frac{Pertes_{550^{\circ}C} [g]}{Masse_{105^{\circ}C} [g]}$$
$$Pertes_{1000^{\circ}C}[\%] = 100 * \frac{Pertes_{1000^{\circ}C} [g]}{Masse_{105^{\circ}C} [g]}$$

4.3.5. Nitrates, nitrites et ammonium

Les formes d'azote minérales mesurées sont les nitrates (NO_3^-), les nitrites (NO_2^-) et l'ammonium (NH_4^+). Les mesures sont réalisées sur les échantillons de sol frais préalablement conservés à 4 °C. Une solution homogène de 30 g de sol mélangé à 30 mL d'eau est préparée. Cette solution est traitée avec un filtre en papier et récoltée dans un tube d'échantillonnage. Une fois que la solution est filtrée, les mesures sont réalisées à l'aide du kit MQuant® qui sont des tests à bandelettes.

Pour les nitrates et les nitrites, il faut réaliser un test de bandelette en la baignant dans la solution pendant une à deux secondes. Le test nitrites ne permettent d'obtenir qu'un résultat qualitatif (- ; + ; +++) pour comparer les sites entre eux. Pour les nitrates, les résultats permettent une estimation dans la gamme suivante : 0 – 10 – 25 – 50 – 100 – 250 – 500 mg/kg.

Pour l'ammonium, 5 mL de la solution sont prélevé, puis une dizaine de gouttes d'une solution colorimétrique y sont ajoutée. La solution est mélangée quelques secondes avant d'introduire la bandelette. Les résultats se trouve dans la gamme suivante : 0 – 10 – 30 – 60 – 100 – 200 – 400 mg/kg.

4.3.6. Éléments traces métalliques

L'analyse en éléments traces métalliques (ETM) se réalise sur des échantillons de sols préalablement broyés (quelques grammes) placés de manière homogène dans un porte-échantillon permettant aux rayons X d'atteindre l'échantillon sans être absorbés ou atténués par le matériau de la fenêtre d'analyse.

L'analyse spectrométrique de fluorescence des rayons X (pXRF Niton xl3t gold+) permet la détermination quantitative des éléments chimiques (plomb, arsenic, zinc, cuivre, fer, manganèse, chrome, vanadium et calcium) présents dans un échantillon (Williams et al., 2020). Le principe se repose sur la fluorescence X, un matériau émet de l'énergie sous forme de

rayonnement X lorsqu'il est exposé à un rayonnement X externe. Le spectromètre détecte et analyse le rayonnement X émis par l'échantillon pour déterminer les éléments chimiques présents dans l'échantillon. Deux types d'analyses sont effectués (Hébert and Dubé-Loubert, 2021) : (1) l'analyse « soil » est optimisée pour l'analyse des éléments traces ; (2) l'analyse « mining » est optimisée pour l'analyse des éléments chimiques majeurs (>1 %). Les mesures prennent chacune 90 secondes. Le porte-échantillon est soigneusement nettoyé à l'éthanol et séché entre chaque analyse d'échantillon.

Chaque analyseur pXRF ayant un biais intrinsèque qui influence la calibration interne, les résultats sont corrigés en utilisant une calibration interne au laboratoire entre pXRF et ICP-OES (méthode de mesure standard après attaque à l'eau régale).

4.4. Caractérisation physique

4.4.1. Structure

La structure des sites est évaluée visuellement (Figure 17) à l'aide du test d'évaluation visuelle de la qualité de la structure du sol (VESS) en déterrants un bloc de sol d'environ 25 cm de profondeur (si le sol le permet) avec une bêche (Ball et al., 2007). Les mottes du sol sont effritées et différentes observations du sol sont réalisées : la taille et l'apparence des agrégats, la porosité visible et les racines, l'apparence du sol après rupture, les traits distinctifs et l'apparence des fragments. Chaque caractéristique est notée, ce qui permet d'obtenir une évaluation globale de la qualité de la structure du sol, allant du sol friable au sol très compact.



Figure 17 - Test à la Bêche

En complément au test à la bêche, un **slake test simplifié** est utilisé (Figure 18). En évaluant la perte de masse des agrégats dans l'eau au fil du temps, il est possible d'obtenir des indications sur la stabilité structurale du sol. Cependant, ce test est généralement utilisé sur des sols cultivés, sujet à la dégradation ou à l'érosion et non pas sur des sols urbains. L'expérience est réalisée en utilisant des blocs de sol de 10 cm de côté et d'une profondeur de 5 cm environ pour chaque site. Ces blocs sont placés sur un grillage de la même taille, dont la maille a une dimension de 1,3 cm. Le grillage est immergé dans un bécher de 10 L, rempli d'eau, en utilisant des câbles fixés au grillage. Ces derniers sont reliés à une balance. Les mesures de masse sont effectuées à intervalles réguliers de 5 minutes pendant 30 minutes avec des mesures supplémentaires réalisées les 5 premières minutes si la désagrégation est rapide. Il convient d'attendre une minute avant de commencer à prendre les mesures puisque la masse du sol augmente rapidement au début car l'air est remplacé par l'eau dans les porosités de l'échantillon (Yoro and Godo, 1990).



Figure 18 - Dispositif expérimental pour l'évaluation de la structure via le slake test simplifié

4.4.2. Granulométrie

La détermination de la granulométrie suit le principe du tamisage suivi d'une sédimentation à l'aide de 10 g de sol tamisé à 2 mm placé dans un bécher de 500 mL. Premièrement, la MO du sol est détruite à l'aide d'une solution de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) concentré à 6 %, à pH 5,5. Les 200 mL de la solution sont ajoutés en 4 fois, le tout en agitant la solution avec une baguette en verre et en attendant que la mousse créée par la réaction avec l'échantillon retombe. Les béchers sont ensuite placés sur une plaque chauffante à 50 °C pendant une à deux nuits.

Deuxièmement, les argiles sont défloculées dans la solution à l'aide de 50 mL d'une solution dispersante (36 g/L d'hexamétaphosphate de sodium + 8 g/L de Na_2CO_3). L'échantillon est bien mélangé à l'aide de la baguette en verre, et ensuite traité aux ultrasons pendant deux minutes à l'aide d'un sonicateur pour faciliter la dispersion des particules dans la solution.

Troisièmement, les échantillons sont introduits dans une colonne graduée de 1 L, le tout au travers de deux tamis, un tamis de 200 μm et un tamis de 50 μm afin de séparer respectivement les sables grossiers (SG) des sables fins (SF). Toute la solution est soigneusement récupérée du bécher et introduite dans la colonne à l'aide d'eau du robinet. Les sables sont récupérés dans deux coupelles préalablement labélisées et pesées, puis placées dans une étuve à 105 °C pendant au moins une nuit, avant d'être repesées. La différence de masse correspond à la masse de sable.

Quatrièmement, les colonnes sont portées au volume de 1 L. Il reste à récolter les fractions limoneuses grossières (LG) et fines (LF), ainsi que les argiles (A). La colonne est homogénéisée mécaniquement à l'aide d'un agitateur. Au temps 0, un premier prélèvement de 20 mL est réalisé à mi-hauteur de la colonne à l'aide d'une pipette et comprend : LG + LF + A. Au temps 4 min et 48 s, on prélève 20 mL à 30 cm de hauteur de la colonne, afin de récupérer : LF + A. Après 24 h, on prélève 20 mL à 10 cm (en bas de la colonne), pour récupérer uniquement : A. Ces fractions sont collectées dans des flacons en verre préalablement labélisés et pesés et placés dans une étuve à 105°C pendant au moins une nuit pour mesurer les différences de masse.

Les données brutes obtenues pour la granulométrie sont donc les masses des coupelles et des flacons en verre avant et après la manipulation. Tout d'abord, la masse de la solution dispersante (HMP) est retirée en sachant que sa concentration initiale est de 44 g/L, que le volume introduit dans la colonne est de 0,04 L et que le volume prélevé est de 0,02 L, la masse contenue dans chaque flacon est obtenue en posant l'hypothèse que la solution dispersante est équitablement répartie dans la colonne.

$$\text{HMP}_{1\text{L}} [\text{g}] = 44 [\text{g/L}] * 0,04 [\text{L}] = 1,76 [\text{g}]$$

$$\text{HMP}_{0,02\text{L}} [\text{g}] = 1,76 [\text{g/L}] * 0,02 [\text{L}] = 0,0352 [\text{g}]$$

Une fois la masse de HMP identifiée, les masses des fractions A, LF et LG peuvent être obtenus par différence de masse. Pour les argiles, il faut soustraire la masse de HMP présente dans les 20 mL prélevés précédemment.

$$\begin{aligned}
m_{LG} &= m_0 - m_{4min48} \\
m_{LF} &= m_{4min48} - m_{24h} \\
m_A &= m_{24h} - m_{HMP}
\end{aligned}$$

Une fois les masses obtenues, elles sont divisées par le volume prélevé (0,02 L) pour savoir quel part des 10 g initiaux est occupée par les fractions correspondantes afin de calculer les pourcentages de chaque classe. Finalement, les sous-fractions sont regroupées en trois classes pour construire un diagramme textural : les sables, les limons et les argiles.

4.5. Caractérisation biologique

4.5.1. Activité des microorganismes *via* le Tea Bag Index

L'estimation de l'activité biologique (microorganismes et microfaune) se réalise *in situ* à l'aide d'un protocole mettant en jeu des sachets de thé (Keuskamp et al., 2013) afin de calculer un Tea Bag Index (TBI). Cette méthode simple et économique repose sur l'incubation de sachets de thé standardisés dans le sol pour mesurer la décomposition par les micro-organismes du sol. Deux types de thé sont utilisés : des sachets de thé vert et de thé rouge (

Figure 19). L'utilisation de ces deux types de thé permet d'évaluer la capacité du sol à décomposer des molécules ayant une décomposabilité plus ou moins élevée, le thé rouge étant plus récalcitrant que le thé vert. Ainsi, il devient possible d'évaluer la capacité à fournir des nutriments sur le court ou long terme.



Figure 19 - Sachets de thé synthétiques utilisés pour le calcul du Tea Bag Index

Un total de 180 sachets de thés (90 sachets de thé rouge et 90 sachets de thé vert) sont préalablement labélisés, puis séchés pendant 48 h dans une étuve à 70 °C avant d'être pesés (étiquette comprise) sur une balance de précision (précision de 0,001 g). Sur le terrain, ils sont placés en alternance à égale distance du cercle et à environ 8 cm de profondeur. La période d'incubation s'est déroulée entre le 10 février 2023 et le 6 mai 2023, soit une période de 85 jours. A la fin de cette période, les sachets sont déterrés. Les particules de sols adhérentes sont retirées. Les sachets de thés sont séchés pendant 48 h dans une étuve à 70 °C avant de retirer les particules restantes. Ils sont repesés avec une balance de précision (précision de 0,001 g). Avec les données récoltées, le TBI peut être calculé. Il varie entre 0 (aucune décomposition) et 1 (décomposition complète). A l'aide de ce TBI, un facteur de stabilisation (S) est calculé (Mori, 2022). Plus il est élevé, plus la décomposition est faible. Avec $H_g = 0,842$, la fraction hydrolysable des sachets de thé verts.

$$TBI [] = \frac{Masse_{initiale}[g] - Masse_{finale}[g]}{Masse_{initiale}[g]}$$
$$S = \frac{H_g - TBI}{H_g}$$

4.5.2. Vers de terre

L'analyse des VDT se réalise *in situ* à l'aide du protocole du test à la bêche proposé par l'observatoire participatif des vers de terre (Université de Rennes, 2023) consistant à extraire des blocs de sol pour les trier manuellement afin de récupérer les vers. Un bloc par zone d'environ 20 cm de côté et de 25 cm de profondeur (si le sol le permet) est prélevé et placé sur une bâche pour être mesuré. Les mottes de terre sont effritées, les VDT sont récupérés et le tri se poursuit jusqu'à ce que les mottes aient un diamètre inférieur à 1 cm. Les vers sont nettoyés à l'eau et disposés sur une surface claire afin de procéder à la détermination qui se réalise à l'aide d'une clé d'identification qui distingue les VDT en quatre groupes fonctionnels : les endogés, les épigés, les anéciques et les épi-anéciques. Finalement, le trou est rebouché et les vers sont replacés à la surface du sol. Le nombre de VDT est rapporté à un volume de 1 m³ afin de comparer les données entre les sites.

4.6. Traitement de données

4.6.1. Descriptions géographiques des sites d'études

Un volet de système d'information géographique (SIG), qui permet de traiter et d'analyser des données géographiques est réalisé sur le logiciel QGIS (3.16.10) afin de calculer le degré d'artificialisation présent autour de chaque site. Pour se faire, des zones tampon de 50 m de rayon sont formées puis superposées à la carte d'usages des sols de Wallonie (revêtement artificiel, constructions artificielles, couvert herbacé, forêts, *etc.* ; WALOUS, 2018). Le degré d'artificialisation est calculé en prenant les infrastructures artificielles par rapport à la surface totale de la zone tampon.

4.6.2. Analyses statistiques

L'ensemble des moyennes et des écarts-types pour les données expérimentales des sites sont calculés à l'aide du logiciel Microsoft Excel. Par ailleurs, une matrice de corrélation est construite afin de visualiser les coefficients de corrélation de Pearson (*r*) entre les variables étudiées. Cette matrice est construite à l'aide du logiciel libre R (version 4.2.3, R Core Team, 2023) et le package « corrplot » (version 0.92). Enfin, une analyse en composantes principales (ACP) est réalisée sur les variables étudiées *via* les packages « FactoMineR » (Lê et al., 2008) et « factoextra » (Kassambara & Mundt, 2020). Ces variables sont préalablement centrées et réduites.

5. Résultats

5.1. Caractérisation géographique

Pour chaque site, la proportion de surface artificialisée dans un rayon de 50 m est évaluée, appelé **degré d'artificialisation**. Ce degré d'artificialisation prend en compte les constructions artificielles (rouge), et les revêtements artificiels (gris) présent dans le rayon défini (Figure 20).

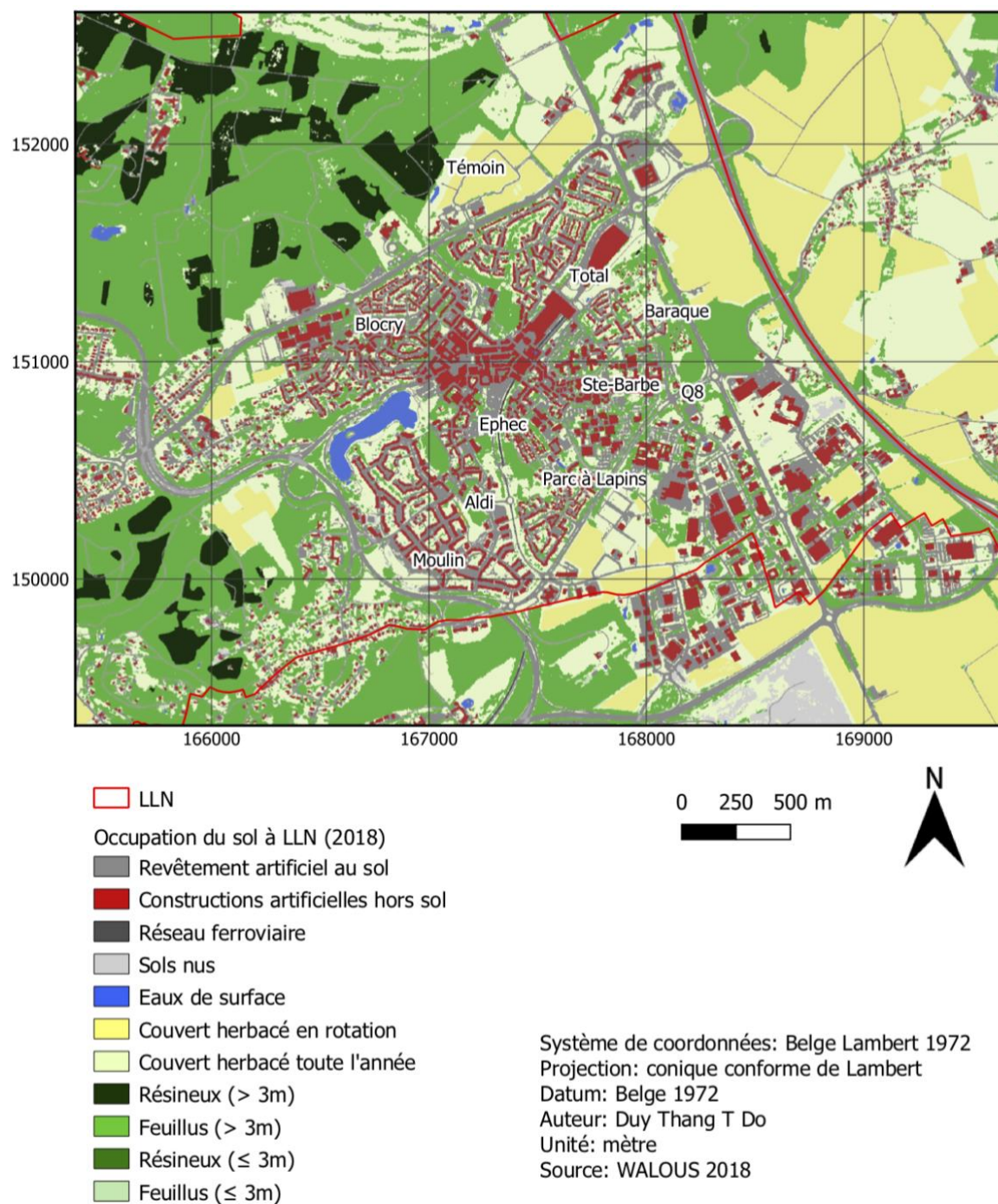


Figure 20 – Carte d'occupation du sol à LLN en 2018 (Walous)

Le site **témoin** montre un degré d'artificialisation de seulement 3 % (Tableau 3), résultant d'une route d'accès au bois de Lauzelle passant à proximité de la parcelle d'étude. Les points d'échantillonnage des **parcs**, situés au cœur de zones végétales, présentent des degrés d'artificialisation relativement faibles (entre 15 et 40 %) puisqu'ils sont situés au milieu de zones végétales mais restent en milieu urbain. À l'inverse, les **parkings**, l'**aire de pique-nique** et les **zones piétonnes** présentent des résultats entre 54 et 66 % car plus urbanisés dans les 50 m aux alentours. Finalement, le site **Total** présente 33 % de surfaces artificielles bien que placée entre deux routes car localisé sur un terrain vague considéré comme un « couvert herbacé » dans l'usage des sols (Walous, 2018) malgré une végétation limitée par la présence régulière d'engins de chantiers (travaux du quartier Courbevoie).

Tableau 3 - Degré d'artificialisation et usage des sites d'études de Louvain-la-Neuve

Nom du site	Diminutif	Usage	Degré d'artificialisation [%]
Parcelle Témoin	Témoin	Agricole	3
Parc à Lapin	Lapin	Parc récréatif	15
Parc des Bruyères	Bruyères		22
Jardin de Moulinsart	Moulin		25
Parc de la Baraque	Baraque	Parc résidentiel	41
Parking Sainte-Barbe	Sainte-Barbe	Parking	66
Parking de l'Ephec	Ephec		56
Blocry	Blocry	Zone piétonne	62
Pompe Q8	Q8	Aire de pique-nique	54
Pompe Total	Total	Terrain vague	33

L'objectif de cette étude est d'observer si le pourcentage d'artificialisation est **corrélé** aux paramètres de santé du sol. Cependant, bien que ce paramètre donne une vue générale de l'impact que peut avoir les activités humaines sur le site, il ne considère pas la complexité de l'environnement unique de chaque site. Le degré d'artificialisation ne témoigne pas des activités environnantes : la densité des constructions artificielles peut entraîner une augmentation de la pollution en raison des émissions industrielles, la fréquence de personnes et des véhicules qui traversent le site peut provoquer une compaction des sols ce qui compromet le développement des plantes, le type de végétation aux alentours peut influencer la biodiversité des sols, les caractéristiques géologiques locales influencent la stabilité du sol, *etc.* De plus, les mauvaises pratiques de gestion du site peuvent intensifier les risques présentés.

Par exemple, bien que le degré d'artificialisation de Total est plus faible que Baraque, il semble davantage influencé par l'usage du site puisque Total est placé à proximité d'un chantier de construction où des engins de chantiers passent régulièrement alors que seulement quelques promeneurs passent par Baraque.

5.2. Caractérisation chimique des sites

5.2.1. pH

Le pH moyen des sols de Louvain-la-Neuve est de 7,0. Il s'étend entre 5,9 (Parc à Lapins) et 8,1 (Total), signifiant que la plupart des sites d'études est légèrement alcalin ou légèrement acide (Figure 21). Seul le site témoin est plus acide avec un pH d'environ 5,5.

Le pH acide du site **Témoin** peut s'expliquer par le fait que c'est un sol agricole. En effet, les plantes cultivées prélèvent des cations échangeables comme le calcium ou le magnésium qui sont des nutriments présents sur les sites disponibles de la CEC du sol et libèrent des ions hydrogène en échange. L'absence de recyclage des nutriments par le prélèvement des plantes appauvrit constamment le sol en nutriments ce qui acidifie le sol. Ajoutons que l'utilisation potentielle d'engrais est susceptible d'acidifier les parcelles agricoles, tels que les engrais ammoniacaux contenant des ions d'hydrogène qui peuvent directement contribuer à l'acidification du sol lors de l'absorption par la plante.

Les quatre sites les plus alcalins (**Total, Blocry, Ephec et Q8**) présentent des valeurs situées entre 7,85 et 8,05. Ceci peut s'expliquer par la présence naturelle de carbonates dans les sols ou par la présence d'artéfacts carbonatés apportés par exemple *via* des matériaux de construction. La diversité des pH observés peut être dû aux remaniements constants que subissent les sols urbains à cause des activités humaines et des changements d'usage du sol.

Les valeurs de pH ont une forte incidence sur la disponibilité des minéraux majeurs, secondaires et traces mais aussi sur la teneur en polluants. Des toxicités apparaissent par mise en solution de quantité excessive d'aluminium, de fer et de manganèse avec un pH inférieur à 6 (Bucaille, 2020). Au contraire, l'ensemble des minéraux sont moins disponibles au-dessus d'un pH de 7,5. De manière générale, un pH aux alentours de 6,5 semble être un bon compromis concernant la disponibilité des minéraux si un développement correct de la végétation est souhaité pour un usage agricole ou un usage récréatif comme les parcs. Seul quatre sites se situent dans cette gamme : **Moulin, Bruyères, Baraque et Sainte-Barbe** et sont majoritairement des parcs. Le parc à **Lapin** est quant à lui plutôt acide avec un pH de 6,0.

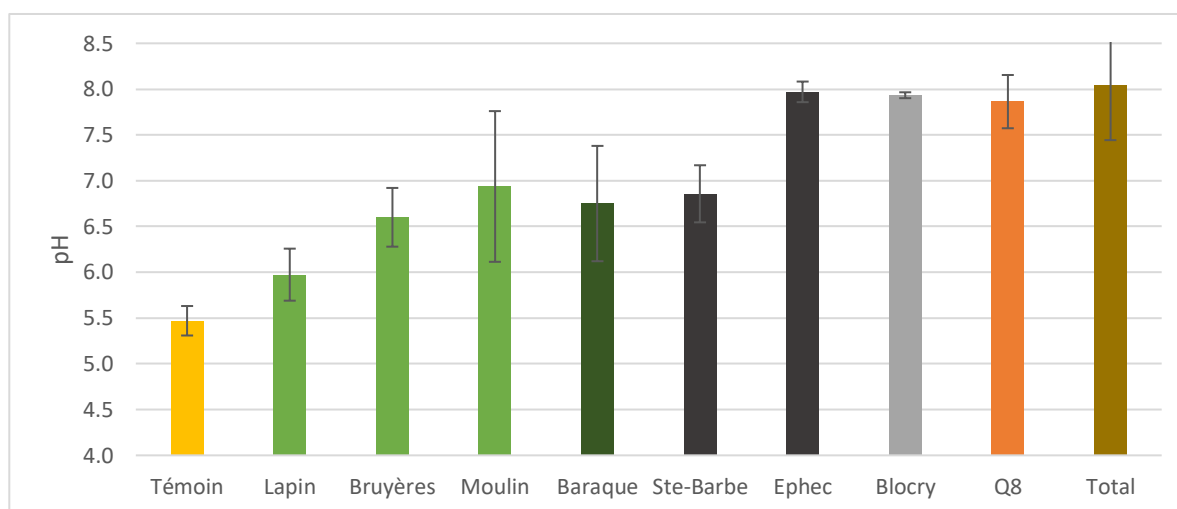


Figure 21 - pH moyen des sites d'études de Louvain-la-Neuve. Les couleurs de la figure correspondent à l'usage des sols décrits dans le Tableau 3.

5.2.2. Capacité d'échange cationique, taux de saturation & cations échangeables

La CEC mesurée dans les échantillons de sols des différents sites (Figure 22) est en moyenne de $10 \text{ cmol}_c/\text{kg}_{\text{sol}}$ et oscille entre des valeurs de 8 (Parc à Lapins) à $13 \text{ cmol}_c/\text{kg}_{\text{sol}}$ (Q8). Ces valeurs indiquent que les sols de Louvain-la-Neuve possèdent une capacité modérée dans la rétention et l'échange des cations (Requasud, 2023). Seul le site **Total** obtient des résultats bien plus faibles avec une CEC de seulement $5,6 \text{ cmol}_c/\text{kg}_{\text{sol}}$ ce qui laisse penser qu'il y a un faible complexe organo-minéral. Ce complexe est l'interaction entre les composants organiques comme la MO et les particules minérales du sol, il est responsable de la rétention des cations. Cela signifie que ce site contient peu de MO ou qu'il est pauvre en argiles. En ce qui concerne les autres sites, aucune différence significative est observée selon le type d'usage, qu'il soit peu ou fortement artificialisé.

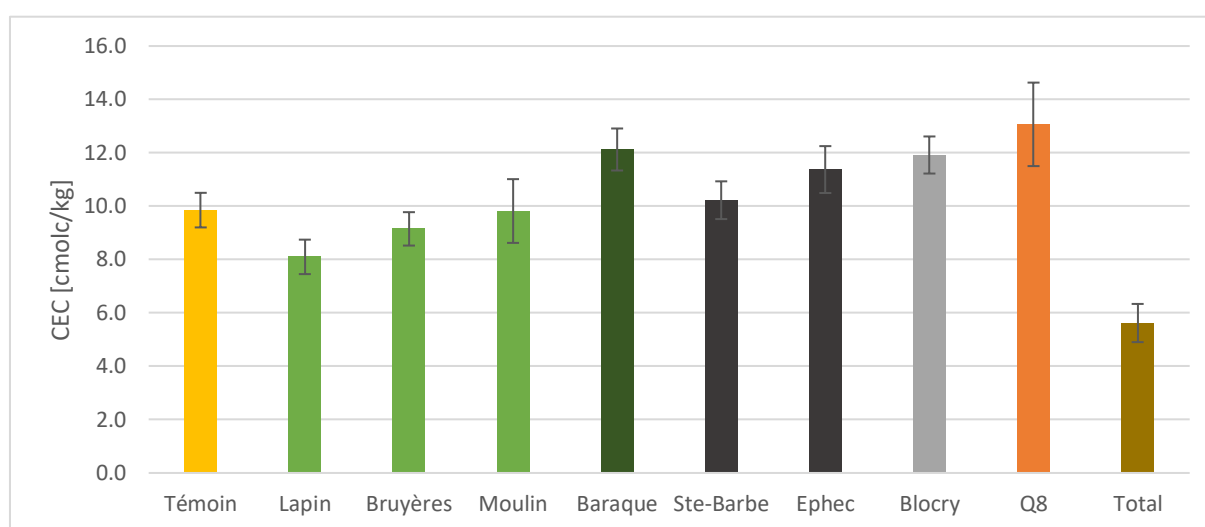


Figure 22 - CEC moyenne [cmol_c/kg] des sites de Louvain-la-Neuve. Les couleurs de la figure correspondent à l'usage des sols décrits dans le Tableau 3.

Le taux de saturation moyen est de 94 % et oscille entre 80 et 100 % (Tableau 4). Les sites d'échanges de la CEC sont donc largement occupés par les cations échangeables non acides pour tous les sites. Un taux d'environ 90 % constitue généralement un optimum pour un bon développement de la végétation (Bucaille, 2020). Les taux de saturation des parcs **Bruyères**, **Baraque**, **Lapin** et **Moulin** ainsi que du parking **Sainte-Barbe** sont très proches de cet optimum. Le taux de saturation de la parcelle **Témoin** est de 80 %, et est considéré comme un bon taux, mais il est inférieur à tous les autres sites pouvant signifier qu'il adsorbe moins les cations. Quatre sites (**Blocry**, **Q8**, **Ephec**, **Total**) ont des taux de saturation supérieurs à 100 %, indiquant que la somme des cations échangeables occupe la totalité de la CEC, pouvant réduire la disponibilité des autres nutriments essentiels pour les plantes, et qu'une partie des cations échangeables analysés ne provient pas de la CEC. Seuls les sites à pH alcalins présentent une saturation supérieure à 100 % : ceci peut donc être causé par la présence de Ca^{2+} résultant de l'altération des carbonates de calcium (CaCO_3). Les ions Ca^{2+} issus de CaCO_3 peuvent donc être comptabilisés dans la somme des cations échangeables à cause de la décarbonatation partielle lors de l'extraction des cations échangeables (Bucaille, 2020), ce qui explique des taux de saturation supérieur à 100 % (Figure 23).

Tableau 4 – CEC moyenne [cmol_c/kg] et taux de saturation [%] des différents sites d'études de Louvain-la-Neuve

Sites	CEC [cmol _c /kg _{sol}]	S [%]
Témoin	9,9	80
Moulin	9,8	98
Lapin	8,1	82
Bruyères	9,1	93
Baraque	12,1	94
Blocry	11,9	>100
Ste Barbe	10,2	94
Q8	13,1	>100
Ephec	11,4	>100
Total	5,6	>100
Moyenne	10,1	94

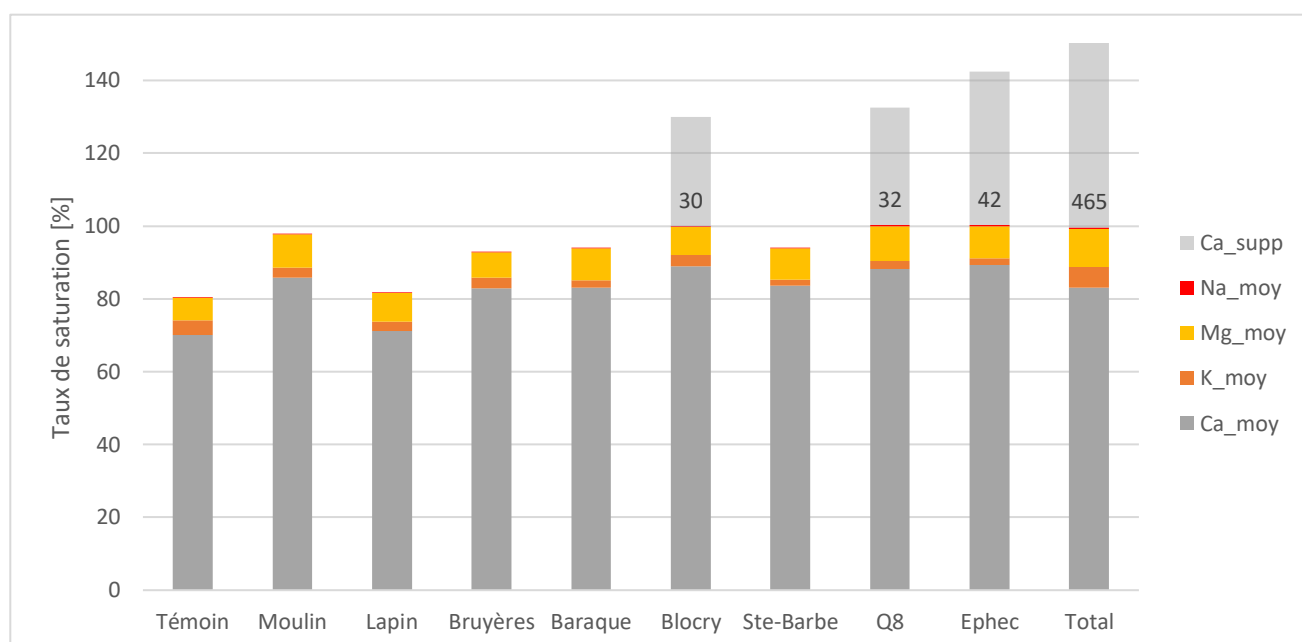


Figure 23 - Taux de saturation moyen [%] de la CEC par les différents cations échangeables des sites de Louvain-la-Neuve. Les étiquettes correspondent au pourcentage de saturation lié au calcium supplémentaire. Le Ca_{supp} correspond au Ca²⁺ qui n'est pas inclus dans la CEC. Il est probablement issu de l'altération partielle des CaCO₃.

La CEC semble majoritairement être occupée par le calcium avec des valeurs comprises entre 4,7 et 11,5 cmol_c/kg_{sol} (>70 % de la CEC) alors que les autres cations occupent moins de 1 cmol_c/kg_{sol} (Tableau 5). Ces résultats indiquent un sol très riche en calcium alors que les autres éléments peuvent sembler limités. Ces résultats peuvent faire écho à la « loi de l'optimum » (Georg Liebscher, 1895) qui établit qu'au-delà d'un certain niveau, la présence d'un élément peut interférer avec les autres qui ne parviendront pas à jouer leur rôle. Autrement dit, la grande teneur en calcium peut nuire à la disponibilité des autres nutriments.

Les proportions des sites en magnésium sont tous inférieurs à 10 % excepté Total. Les sites sont considérés comme carencé puisque les valeurs de proportion d'occupation de la CEC par magnésium doivent idéalement être comprises entre 10 et 15 % (Collaud et al., 1990). Cet élément donne de la stabilité au sol grâce à leur double valence qui aide à retenir ensemble les argiles et les humus. Il agit comme une « colle » en retenant l'eau alors que le calcium au contraire, va donner de l'aération au sol puisque la couche d'eau autour de ce dernier est fine, réservant plus d'espace pour l'air. Son excès peut entraîner la trop grande compaction du sol.

Les proportions des sites potassium se situent entre 1,7 et 5,6 % de la CEC. Les valeurs souhaitées se situent entre 2 et 7 % (Bucaille, 2020) ce qui signifie que les sites ne sont pas carencés, excepté Sainte-Barbe. Cet élément a de multiples rôles pour le métabolisme de la plante.

Les valeurs de sodium sont toutes inférieures à 0,03 cmol_c/kg_{sol}, représentant bien moins de 0,5 % d'occupation de la saturation de la CEC ce qui est considéré comme une carence (Bucaille, 2020). Or, le sodium joue un rôle dans la régulation de la circulation de l'eau et cette carence peut se répercuter sur la santé des plantes puisque la capacité du sol à retenir l'eau est altérée.

Tableau 5 - Occupation moyenne de la CEC [%] des différentes cations échangeables des sites de Louvain-la-Neuve

Sites	Ca [%]	Mg [%]	K [%]	Na [%]
Témoin	70,0	6,2	4,2	0,1
Moulin	85,9	9,2	2,6	0,1
Lapin	71,2	7,7	2,6	0,1
Bruyères	82,9	7,0	2,9	0,1
Baraque	83,1	8,8	2,0	0,2
Blocry	89,2	7,7	3,1	0,1
Ste Barbe	83,7	8,6	1,7	0,1
Q8	87,9	9,6	2,2	0,3
Ephec	88,6	8,8	2,0	0,2
Total	83,4	10,5	5,6	0,5
Moyenne	82,6	8,5	2,9	0,2

5.2.3. Carbone total & matière organique

Le contenu en carbone total moyen est de 1,55 % (Figure 24), il apparaît assez constant entre les sites et oscille entre 1,4 et 1,65 % de la masse du sol. La valeur de référence minimale conseillée pour des sites agricoles est de 1,15 % (Vincent et al., 2019). Pour un usage qui requiert un bon développement de la végétation comme les parcs, les prairies, ou les parkings où l'on souhaite une plus grande verdurisation, les valeurs obtenues sont suffisantes. Cependant, l'**Ephec** et **Total** font exception avec une valeur plus faible de 0,89 % pour l'Ephec et plus élevé de 2,05 % pour Total.

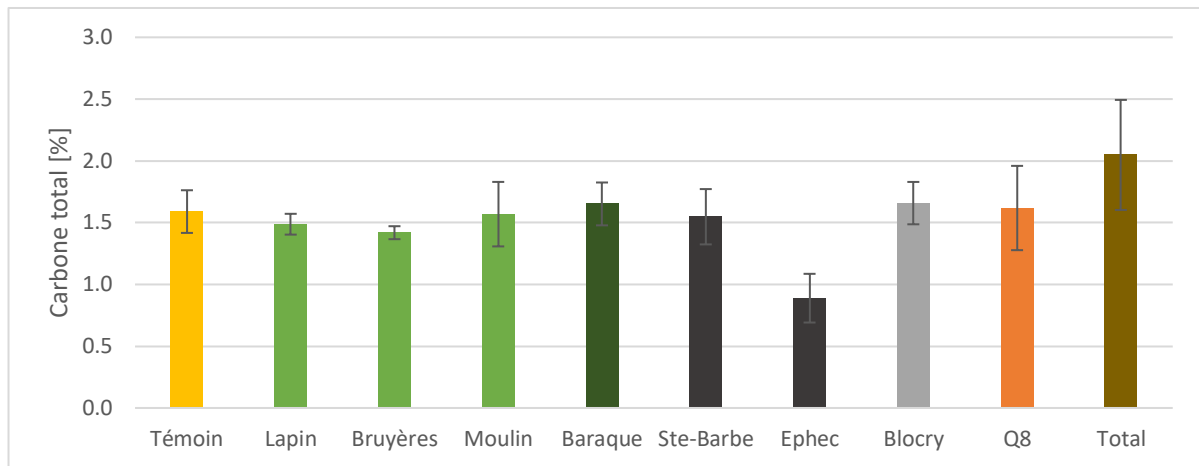


Figure 24 - Carbone total [%] moyen des sites de Louvain-la-Neuve. Les couleurs de la figure correspondent à l'usage des sols décrits dans le Tableau 3.

Le carbone total est un indicateur intéressant à étudier. Cependant, c'est surtout le carbone organique (CO) contenu dans la MO qui est primordial puisqu'il est directement mobilisable par les microorganismes au contraire du carbone inorganique (CI) potentiellement présents pour des pH supérieurs à 7,5. Des pertes au feu à 550°C (PAF550) et à 1000°C (PAF1000) sont réalisés afin d'évaluer la fraction organique du carbone total.

La Figure 25 montre la relation entre le carbone total et la PAF550. En excluant le site Total qui s'éloigne fortement de la relation avec les autres points, la relation trouvée entre le carbone total, qui peut être approximé comme étant du carbone organique, et la PAF550 est :

$$C_{total} [\%] \approx C_{organique} [\%] = 0,41 * PAF_{550}$$

Or, le facteur de conversion entre le carbone organique et la matière organique est généralement de 0,58 (Heaton et al., 2016). Cette différence de facteur de conversion observé montre une sous-estimation de la matière organique dans le PAF550, suggérant que l'entière de la matière organique n'est pas brûlée à cette température. L'hypothèse posée est que des résidus de MO présents dans des associations organo-minérales avec les argiles peuvent résister à 550 °C et expliquer ainsi cette sous-estimation. Bien que ce biais soit suggéré, la PAF550 est considéré comme un proxy du taux de MO du sol sans être interprété de manière absolue.

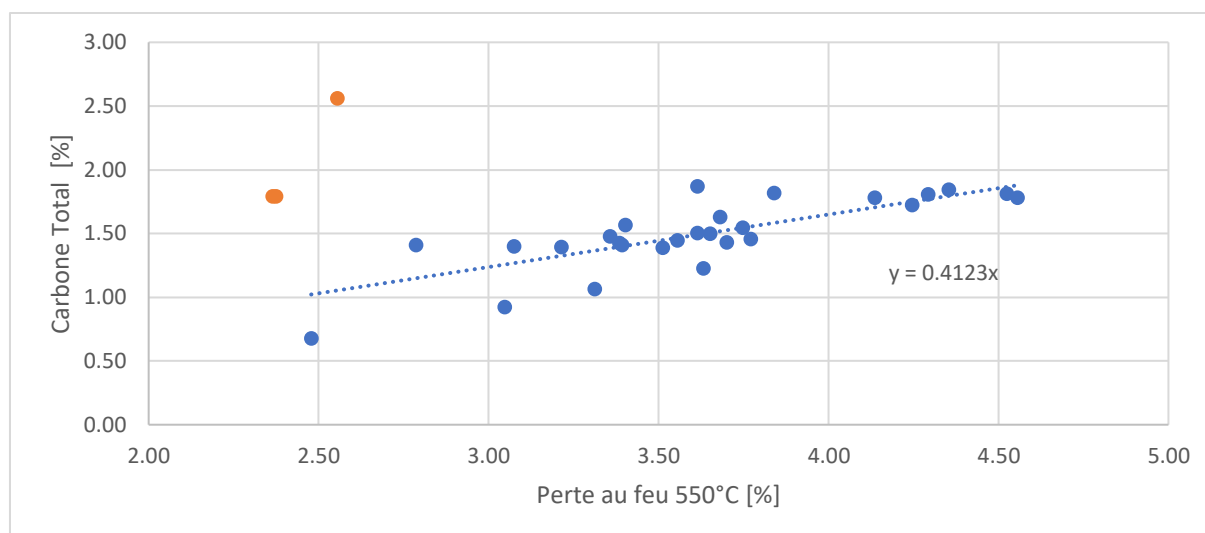


Figure 25 - Carbone total [%] en fonction de la perte au feu 550 °C [%] des sites de Louvain-la-Neuve. Les points oranges représentent les trois zones du site Total

La PAF550 (

Tableau 6) est en moyenne de 3,5 % de la masse initiale sèche et varie entre 2,3 (Total) et 4,2 % (Baraque). La PAF550 de tous les sites est relativement constante pour tous les sites. Seuls **Total** et **Ephec** présentent des taux relativement faibles, suggérant un sol pauvre en MO, résultant probablement de la faible quantité de végétation aux alentours pour ces sites. **Témoin** et **Baraque** ont quant à eux des taux relativement élevés, provenant probablement de la densité de végétation. Notons que pour le site Ephec, l'estimation du taux de carbone organique (1,24 %) calculé s'avère être supérieur au taux de carbone total (0,87 %). L'hypothèse posée est que la matière organique chez Ephec peut ne pas contenir autant de carbone que la matière organique des autres sites.

La PAF1000 est de 5,8 % de la masse initiale sèche en moyenne et varie entre 5,1 (Lapin, Bruyères) et 6,9 % (Q8). Cependant, c'est surtout le rapport entre les deux PAF qui est intéressante puisqu'il est un indicateur de ce qui a brûlé entre 550 °C et 1000 °C comme les carbonates. Sa moyenne est de 1,7 et varie entre 1,5 (**tous les parcs** et **Blocry**) et 2,3 (**Total**). Le rapport n'étant nulle part proche de 1 même pour des pH faibles, et le test à l'acide chlorhydrique n'ayant pas révélé de présence significative de carbonates pour les sites mis à part pour Total, cela confirme que d'autres matériaux que des carbonates sont détruits par la PAF1000. L'hypothèse posée est que ces matériaux peuvent être des résidus de MO présents dans les argiles qui n'ont pas pu être brûlés à des températures inférieures. Le rapport élevé de chez **Total** témoigne quant à lui de la combustion de carbonates. Les parcs (**Lapin**, **Bruyères**, **Moulin**, **Baraque**), le site **Témoin** mais aussi **Blocry** et **Q8** présentent des rapports assez constants, ce qui suggère une décomposition de matériau comme la MO qui est similaire pour ces sites sans pour autant contenir des carbonates.

Le taux de carbone organique estimé est de 1,45 % en moyenne et varie entre 1,0 (Total) et 1,6 % (Témoin). Il n'y a pas de différence significative entre les sites peu artificialisés (comme le site témoin et les parcs) et les sites plus artificialisés.

Tableau 6 - Pertes au feu à 550 °C et 1000 °C et estimation du carbone organique [%] des sites de Louvain-la-Neuve

Sites	Ctot [%]	Perte au feu 550 °C [%]	Perte au feu 1000 °C [%]	Rapport entre Perte au feu 1000 °C/550 °C [-]	Carbone organique estimé [%]
Témoin	1,57	3,8	5,6	1,5	1,6
Lapin	1,46	3,4	5,1	1,5	1,4
Bruyères	1,40	3,4	5,1	1,5	1,4
Moulin	1,55	3,3	5,6	1,7	1,3
Baraque	1,62	4,2	6,4	1,5	1,7
Ste Barbe	1,52	3,9	6,6	1,7	1,6
Ephec	0,87	3,0	5,6	1,9	1,2
Blocry	1,63	3,8	5,7	1,5	1,6
Q8	1,59	4,0	7,0	1,7	1,7
Total	2,01	2,4	5,6	2,3	1,0
<i>Moyenne</i>	<i>1,52</i>	<i>3,5</i>	<i>5,8</i>	<i>1,7</i>	<i>1,45</i>

5.2.4. Azote total et formes d'azote

La valeur moyenne d'azote total est de 0,13 % et oscillent entre 0,14 (Moulin) et 0,17 % (Témoin) de la masse du sol (Figure 26). Seuls les sites de **l'Ephec** et de **Total** sont plus faibles avec des valeurs respectives de 0,09 et 0,06 % pouvant être le signe de carence. De manière générale, les zones moins artificialisées (Témoin et parcs) ont un contenu en azote supérieur (0,15% de moyenne) aux zones plus artificialisées (0,11% de moyenne), cette différence peut être expliquée par une densité de végétation plus faible.

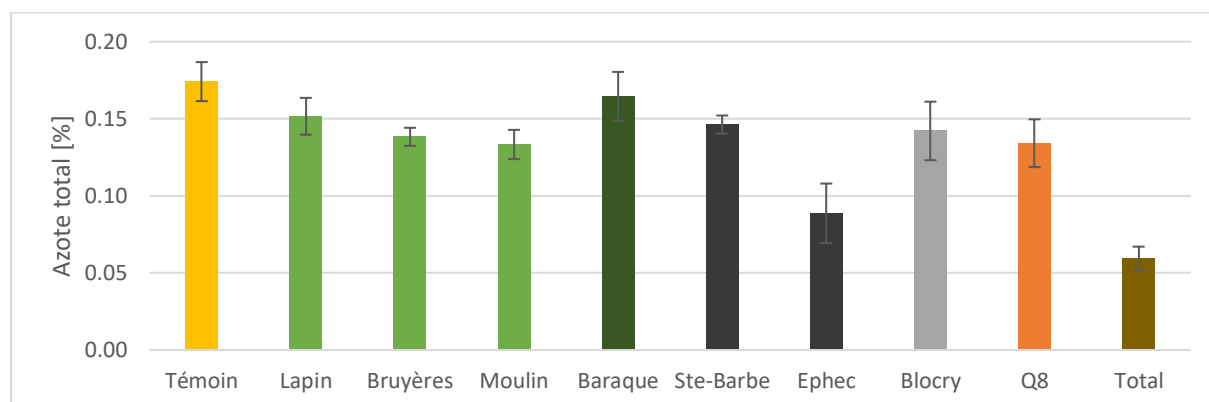


Figure 26 - Azote total [%] moyen des sites de Louvain-la-Neuve. Les couleurs de la figure correspondent à l'usage des sols décrits dans le Tableau 3.

Bien que l'azote total est un indicateur intéressant à analyser, ce sont surtout les formes d'azote comme le NO_3^- qui sont primordiales à étudier puisqu'elles sont directement utilisées par les plantes pour leur métabolisme (Tableau 7). La moyenne de concentration en NO_3^- (Figure 27) est de 23,3 mg/kg et s'étend de 0 (Total) à 66,6 mg/kg (Bruyères). De manière générale, les parcs (**Moulin, Lapin, Bruyères, Baraque**) obtiennent une concentration moyenne 42 mg/kg nettement supérieures aux sites plus artificialisés (**Blocry, Q8, Ephec, Sainte-Barbe**) qui ont une concentration de 13 mg/kg en moyenne. Notons également que la concentration en NO_3^- est de seulement 10 mg/kg pour le site **témoin** alors que cette forme d'azote est

essentielle pour le développement des cultures. Finalement, **Total** ne contient pas de nitrates de par la très faible présence de végétation. La concentration en NO_3^- semble élevée principalement pour les sites dont il y a du passage d'animaux de compagnie, pouvant contribuer à l'augmentation des NO_3^- dans le sol *via* leurs déjections qui en contiennent naturellement. Cependant, les résultats obtenus sont très approximatifs à cause de la méthode d'utilisation de bandelettes, ce qui rend l'interprétation des données compliquée.

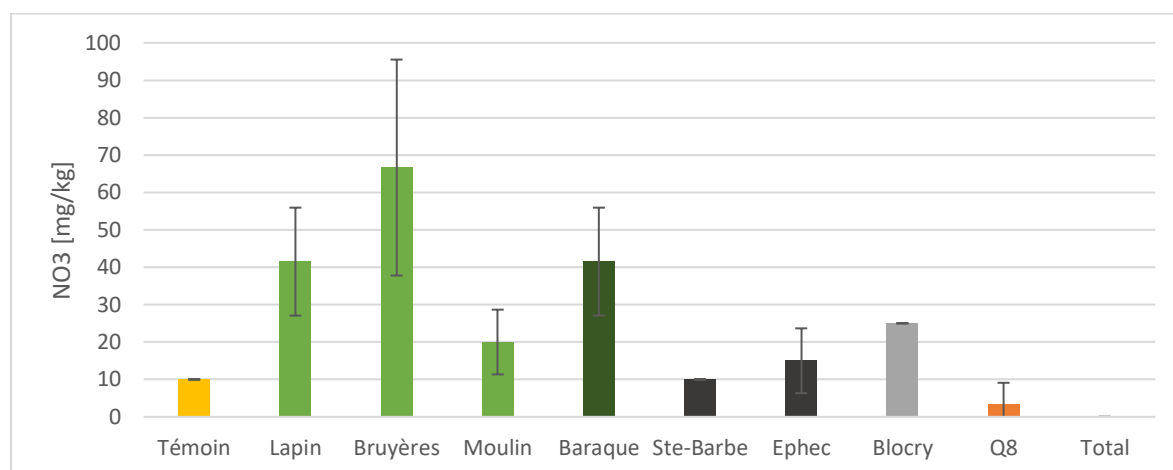


Figure 27 – Concentration [mg/kg] en nitrates des sites de Louvain-la-Neuve. Les couleurs de la figure correspondent à l'usage des sols décrits dans le Tableau 3.

La concentration en NO_2^- s'avère indétectable chez tous les sites. Cela est dû à la très faible teneur en NH_4^+ puisque le NO_2^- est un produit intermédiaire du NH_4^+ en NO_3^- . L'absence de nitrites n'est pas nécessairement un indicateur négatif pour la qualité du sol. En effet, il peut être toxique pour les plantes en cas de concentration élevée, il est donc préférable d'avoir une faible teneur dans le sol. La concentration est faible, voire indétectable en NH_4^+ pour la plupart des sites, ce qui peut remettre en cause les méthodes de mesures approximatifs.

Tableau 7 - Formes d'azote [mg/kg] moyen des sites de Louvain-la-Neuve

Sites	NO_3^- [mg/kg]	NO_2^- [mg/kg]	NH_4^+ [mg/kg]
Témoin	10,00	-	0,00
Moulin	20,00	-	3,33
Lapin	41,50	-	0,00
Bruyères	66,66	-	0,00
Baraque	41,50	-	3,33
Blocry	25,00	-	0,00
Ste Barbe	10,00	-	3,33
Q8	3,33	-	0,00
Ephec	15,00	-	0,00
Total	0,00	-	0,00
Moyenne	23,30	-	1,00

5.2.5. Rapport C/N

Le rapport carbone azote (C/N), calculé grâce au CO estimé par la PAF550, présente une moyenne de 11,5 (Figure 28). Ce dernier est très constant avec 8 sites dont les valeurs oscillent entre 8,6 (Blocry) et 12,3 (Q8). Seul les rapports C/N de **l'Ephec** (13,7) et de **Total** (16,9) sont plus élevés mais cela est expliqué par des valeurs en azote qui sont bien plus faibles de respectivement 0,09 et 0,06 % alors que la moyenne des sites se situe à 0,13 %. Selon la littérature, un rapport C/N situé entre 9 et 11 (Terreom, 2022) semble optimal pour un bon développement des plantes. Les sols urbains de Louvain-la-Neuve ont donc des rapports C/N souhaitables permettant un développement correct de la végétation, mais il sera nécessaire de rester vigilant à garder un taux de CO suffisant pour rester au-dessus d'un rapport de 9, notamment pour les sites **Témoin** (9,0), **Lapin** (9,2) dont les rapports se situent très proches de 9. Et inversement pour les sites **Blocry** (11,3) et **Q8** (12,3), dont les rapport sont supérieurs à 11, qui témoignent d'un taux relativement faible d'azote par rapport au taux de carbone.

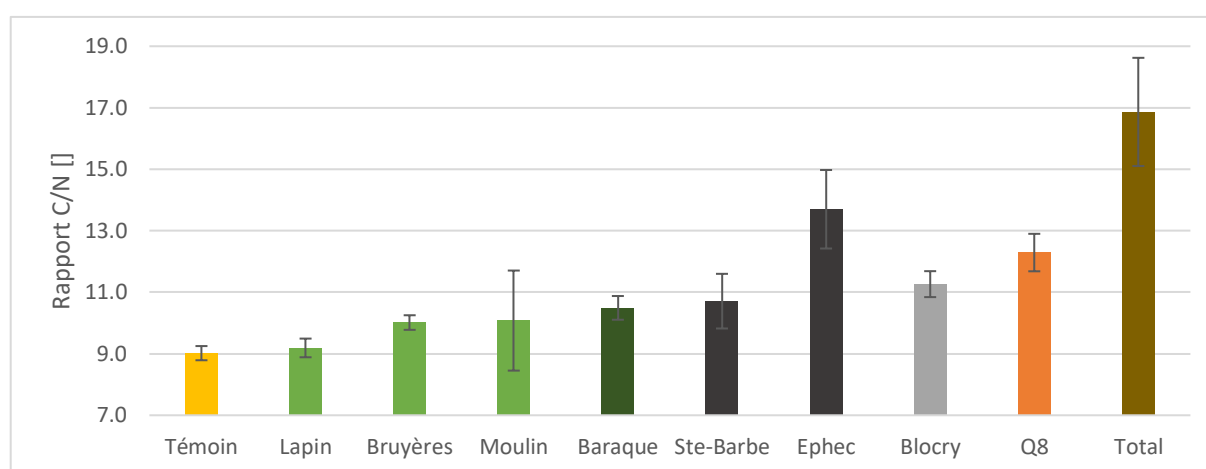


Figure 28 - Rapport C/N moyen des sites de Louvain-la-Neuve. Les couleurs de la figure correspondent à l'usage des sols décrits dans le Tableau 3.

5.2.6. Calcium, fer & manganèse

La teneur moyenne en calcium (

Tableau 8) est de 11 000 mg/kg et s'étend entre 2 850 (Témoin) et 63 000 mg/kg (Total). La moyenne sans le site Total est de 5 300 mg/kg. Les quatre sols (Total, Q8, Blocry, Ephec) dont les teneurs sont supérieures à 7 000 mg/kg sont soumis au test à l'acide chlorhydrique : la formation de bulles confirme des traces de CaCO_3 chez les sites **Blocry**, **Q8** et **Ephec**. Cependant, elle est fortement amplifiée chez **Total** indiquant une forte présence de CaCO_3 .

Il n'y a pas de seuil réglementaire puisqu'en général, des teneurs élevées en calcium dans le sol sont bénéfiques pour la croissance des plantes. Cependant, des teneurs trop excessives peuvent causer des déséquilibres dans les écosystèmes. En effet, la présence de calcium indique souvent la présence de carbonates qui a un effet de « diluant », c'est-à-dire que par sa présence, la teneur des autres éléments, qui peuvent être des nutriments, peut diminuer alors que ceux-ci sont parfois essentiels à la santé du sol et des plantes.

Les valeurs de teneurs fer ont une moyenne de 18 000 mg/kg et s'étendent de 13 400 (Total) à 21 100 (Sainte-Barbe). Ces valeurs sont bien inférieures au seuil fixé par Bruxelles

Environnement. Les teneurs obtenues sont considérées comme acceptables. Il n'y a pas de risque pour la santé à ces teneurs. Pour les valeurs de manganèse, la moyenne est de 300 mg/kg et la gamme s'étend de 150 (Total) à 420 (Témoin). Les données sont également nettement inférieures au seuil fixé. Cependant, ce dernier est un élément essentiel pour le bon développement des plantes, il est donc nécessaire que sa teneur ne soit pas trop faible afin de garantir les fonctions de nutriments pour les plantes.

Tableau 8 – Teneurs moyenne ($\pm$ écart-types) en fer, manganèse et calcium [mg/kg] des sites de Louvain-la-Neuve

Sites	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Ca [mg/kg]
Témoin	14 600 $\pm$ 232	419 $\pm$ 55	2850 $\pm$ 123
Moulin	17 700 $\pm$ 2020	312 $\pm$ 206	4620 $\pm$ 1036
Lapin	17 100 $\pm$ 3900	268 $\pm$ 130	3440 $\pm$ 406
Bruyères	16 600 $\pm$ 1280	425 $\pm$ 36	4170 $\pm$ 364
Baraque	17 700 $\pm$ 767	349 $\pm$ 76	4810 $\pm$ 855
Blocry	20 700 $\pm$ 279	258 $\pm$ 66	7200 $\pm$ 270
Ste Barbe	21 100 $\pm$ 951	221 $\pm$ 20	4670 $\pm$ 466
Q8	19 800 $\pm$ 901	311 $\pm$ 54	8950 $\pm$ 4370
Ephec	21 000 $\pm$ 870	303 $\pm$ 58	7080 $\pm$ 891
Total	13 400 $\pm$ 2200	149 $\pm$ 10	63 000 $\pm$ 24 600
Seuils de Bruxelles Environnements	< 50 000	< 5000	Pas de seuil

5.2.7. Éléments traces métalliques

Les résultats obtenus pour les teneurs en ETM sont comparés avec les seuils fixés par le décret Sols (Legifrance, 2017) selon l'usage récréatif pour tous les sites excepté le site Témoin qui a un usage agricole. En effet, tous les sites se trouvent dans des parcs ou à proximité de lieux de travail (université ou école). Le décret Sols a été mis en place pour encadrer la gestion des sols pollués en Belgique. Il a pour objectif de protéger les sols et les nappes phréatiques en prévoyant des mesures de prévention, de surveillance et de gestion en cas de pollution avérée. Il définit donc des seuils de pollution par ETM à partir desquelles il est obligatoire de lancer une étude approfondie. Tous les seuils sont définis selon le type d'usage du sol (Annexe 7).

Bien que certaines pratiques agricoles peuvent contaminer les sols comme l'utilisation de fertilisants contenant du zinc ou du cuivre ou l'utilisation de pesticides contenant de l'arsenic, la parcelle **Témoin** semble ne pas être contaminée en ETM (Tableau 9). Tous les éléments étudiés présentent des teneurs bien inférieures aux teneurs imposées par le décret Sols pour une utilisation agricole.

Tableau 9 – Comparaison des valeurs moyennes ($\pm$ écart-types) des ETM [mg/kg] du site témoin avec les seuils fixés par le décret Sols (usage agricole)

Sites	Pb [mg/kg]	As [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Cr [mg/kg]	V [mg/kg]
Témoin	19,5 $\pm$ 1,1	4,4 $\pm$ 0,3	35,0 $\pm$ 3,0	11,6 $\pm$ 1,4	14,8 $\pm$ 2,1	32,3 $\pm$ 3,8

Seuil du décret SOLS (agricole)	< 200	< 30	< 196	< 53	< 57	< 100
------------------------------------	-------	------	-------	------	------	-------

Concernant tous les **autres sites d'études**, les teneur en ETM (Tableau 10) sont également nettement inférieures aux seuils fixés par le décret pour l'usage de sol récréatif, et ce pour tous les éléments traces concernés. Les teneurs sont mêmes bien inférieurs aux seuils de l'usage naturel. Les sols sont donc considérés comme sains en ce qui concerne les éléments traces étudiés et ne nécessitent pas de mesures de gestion ou de dépollution supplémentaires. Cela est une bonne indication que les sols peuvent être considérés comme non-pollué et que les risques pour la santé humaine et l'environnement sont faibles.

Tableau 10 - Comparaison des valeurs moyennes ($\pm$ écart-types) des ETM [mg/kg] des sites de Louvain-la-Neuve avec les seuils fixés par le décret Sols (usage récréatif)

Sites	Pb [mg/kg]	As [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Cr [mg/kg]	V [mg/kg]
Moulin	14,1 $\pm$ 4,1	4,65 $\pm$ 0,3	36,0 $\pm$ 3,6	10,4 $\pm$ 0,8	16,8 $\pm$ 3,9	32,5 $\pm$ 4,7
Lapin	7,71 $\pm$ 2,8	4,51 $\pm$ 1,5	21,7 $\pm$ 3,6	7,53 $\pm$ 1,5	16,8 $\pm$ 9,3	29,3 $\pm$ 6,0
Bruyères	12,7 $\pm$ 1,6	7,33 $\pm$ 0,6	34,4 $\pm$ 2,0	6,6 $\pm$ 1,8	21,5 $\pm$ 4,3	35,3 $\pm$ 2,4
Baraque	25,0 $\pm$ 3,2	8,10 $\pm$ 1,2	58,1 $\pm$ 11,7	14,2 $\pm$ 2,1	19,0 $\pm$ 3,4	33,1 $\pm$ 4,8
Blocry	47,0 $\pm$ 28,9	8,12 $\pm$ 1,3	63,9 $\pm$ 10,5	17,4 $\pm$ 4,3	20,8 $\pm$ 0,8	33,3 $\pm$ 2,3
Ste Barbe	10,9 $\pm$ 2,7	5,82 $\pm$ 0,9	29,2 $\pm$ 4,5	7,87 $\pm$ 2,7	20,0 $\pm$ 7,4	28,1 $\pm$ 3,8
Q8	19,3 $\pm$ 4,0	6,97 $\pm$ 0,8	41,9 $\pm$ 4,0	16,9 $\pm$ 1,5	21,0 $\pm$ 4,0	38,1 $\pm$ 3,5
Ephec	8,75 $\pm$ 8,7	6,95 $\pm$ 1,0	29,5 $\pm$ 1,4	11,6 $\pm$ 4,9	21,1 $\pm$ 2,3	39,0 $\pm$ 3,9
Total	14,3 $\pm$ 2,9	5,28 $\pm$ 0,9	55,9 $\pm$ 7,3	15,3 $\pm$ 4,6	11,5 $\pm$ 3,2	23,7 $\pm$ 3,0
Seuil du décret SOLS (récréatif)	< 390	< 40	< 3000	< 490	< 140	< 200

Les faibles teneurs en ETM des sites de Louvain-la-Neuve peuvent s'expliquer par le fait que les sols n'ont pas été utilisés intensivement pas le passé, que ce soit pour des activités industrielles ou agricoles. Avant la construction de la ville de Louvain-la-Neuve dans les années 70, les terres étaient principalement agricoles. L'activité agricole passée peut avoir introduit des ETM dans les sols, tels que le plomb et le cuivre provenant d'engrais ou de pesticides. Cependant, ces éléments peuvent s'être déplacés avec le temps. Ajoutons que les sols urbains sont souvent modifiés ou peuvent provenir de sources extérieures lors de la construction d'infrastructures pouvant parfois éliminer les sols contaminés.

Les industries sont également une source majeure de contamination de l'environnement en ETM notamment *via* les activités de production, de stockage et de transport de produits chimiques, de métaux et de déchets industriels. Mais le niveau d'industrialisation de la ville est très faible puisqu'elle est principalement constituée de bâtiments universitaires, de résidences étudiantes, de commerces, *etc.* Ce faible niveau d'industrialisation peut expliquer ces faibles teneurs en ETM dans les sols.

5.3. Caractérisation physique des sites

5.3.1. Granulométrie

De manière générale, la granulométrie des différents sites varie fortement (Figure 29). La proportion de sables varie entre 9 (Témoin) et 70 % (Total) et la proportion de limons varie entre 21 (Total) et 64 % (Témoin). En revanche, la teneur en argiles varie moins que les deux autres, avec des proportions comprises entre 8 (Total) et 26 % (Témoin). Il y a donc une forte variabilité spatiale en ce qui concerne la granulométrie du sol de Louvain-la-Neuve. La fraction limoneuse semble être la fraction granulométrique la plus élevée pour la plupart des sols. Le site Témoin contient près de deux tiers de limons (64 %), ce qui est en accord avec sa localisation sur le plateau limoneux comme l'ensemble des autres sites d'études (l'ensemble du territoire était autrefois dominé par l'agriculture afin d'exploiter ces sols limoneux). Seuls le **Lapin**, **Sainte-Barbe** et **Total** ont une fraction sableuse supérieure à leur fraction limoneuse avec des valeurs respectives de 39, 51 et 70 %. Aucun sol ne présente une fraction argileuse dominante.

Il est possible d'expliquer les fortes variations de granulométrie en posant l'hypothèse de l'importation de sol. Par exemple, la proportion de près de 70 % de sables de chez Total peut s'expliquer par le fait que les sols soient majoritairement issus de terres exogènes à caractère sableux car il est situé à proximité d'une zone de construction. Pour les sites intermédiaires, il est tout à fait possible qu'il y ait un mixte de sol en place et de sol importé, et ceci dans un objectif d'obtenir un sol plus drainant, souvent plus apte à soutenir la construction d'infrastructures.

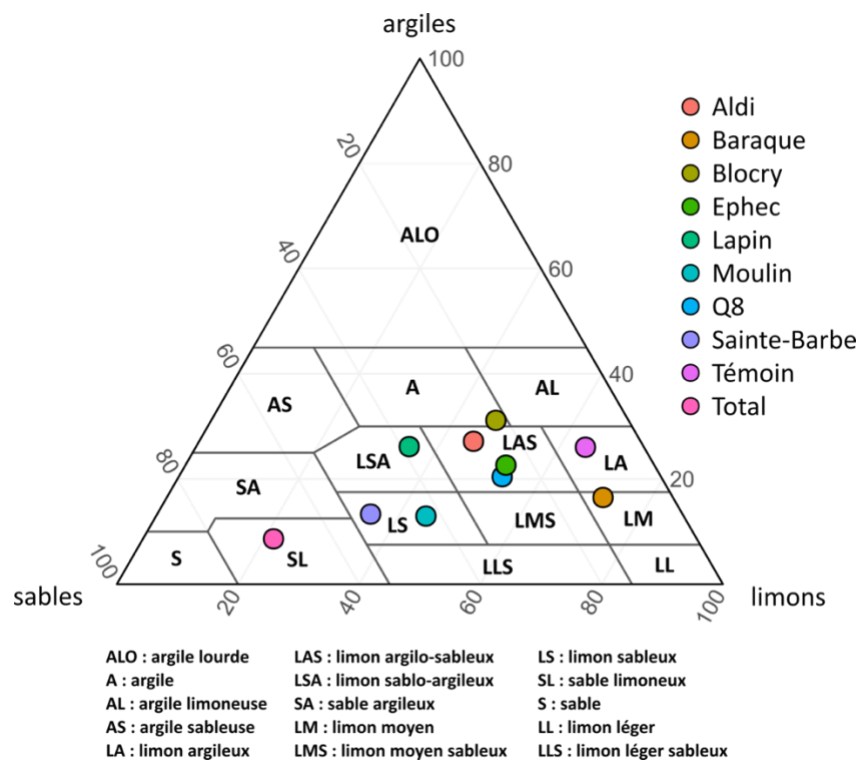


Figure 29 – Triangle textural des sites d'étude de Louvain-la-Neuve

5.3.2. Structure et compaction

- **Slake test**

À l'exception du site Total, aucun site n'a montré de perte de masse significative au cours des 30 premières minutes de test. La perte de particules observée lors du test dans tous les échantillons testés n'a pas pu être mesurée au vu de la précision de la balance (5 g, les échantillons pèsent environ 400 g). La stabilité des sols urbains peut résulter soit des activités humaines à proximité, soit du piétinement répété. De plus, tous ces sites sont couverts de graminées, renforçant leur stabilité grâce à leur racine.

Le site **Témoin**, situé sur une prairie, n'a pas perdu de masse lors du test. La présence de la végétation dense de la prairie contribue fortement à maintenir une bonne stabilité structurale en surface pouvant expliquer le résultat du test. Le site **Total** est le seul site qui présente un comportement distinct (Figure 30) avec une perte de masse initiale rapide suggérant une désagrégation initiale rapide du sol, suivie d'une stabilisation ultérieure. Cela indique une faible stabilité du sol de ce site qui peut s'expliquer par la très faible densité de végétation, et par le remaniement fréquent de ce sol sujet à des activités de constructions aux alentours (

Figure 31). Ces activités impliquent des perturbations importantes du sol comme du remaniement, et des passages d'engins de chantiers.

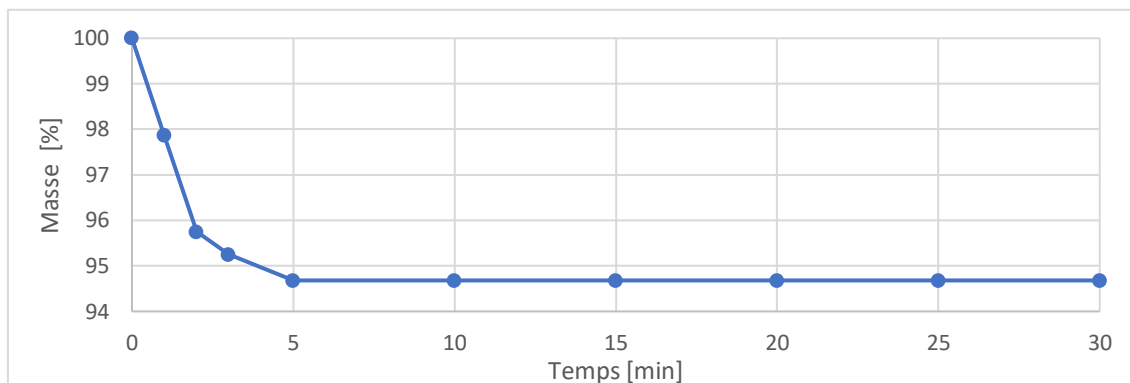


Figure 30 - Évolution de la masse [%] du site Total au cours du temps [min]



Figure 31 – Sites Total sujet à des activités de constructions

Cependant, il convient de remarquer que l'utilisation de ce test a des limites dans ce contexte urbain. Le slake test a été mis en place pour des sols agricoles afin de comparer la structure suite à différentes pratiques culturales comme le labour, la gestion de matières organiques exogènes, *etc.* (Vanwindekens and Hardy, 2022). Bien que la parcelle témoin est une parcelle agricole, elle est une prairie depuis un certain temps, résultant d'une stabilité plus importante. De plus, la perte de masse seule ne fournit pas une analyse complète de la stabilité structurale du sol puisqu'elle ne nous indique pas l'état des agrégats, le degré de compaction, *etc.*

- **Évaluation visuelle de la structure du sol**

La méthode VESS (Ball et al., 2007) est complémentaire au slake test simplifié car elle permet de prendre en compte des paramètres non pris en compte comme l'état des agrégats et la porosité pour donner un score de compacité au sol (Tableau 11).

La parcelle agricole (**Témoin**) et les parcs (**Lapin, Bruyères, Moulin, Baraque**), ont une qualité de la structure friable ou intact avec un score de compaction de 1 ou 2. Ces sites sont peu compacts, offrant une bonne perméabilité à l'eau et à l'air étant bénéfique pour leur rôle qui est principalement le développement correct de la végétation pour un usage agricole ou récréatif.

Les sites dont l'environnement est plus artificialisé comme les parkings (**Ste-Barbe, Ephec, Q8**) et les zones piétonnes (**Blocry**) obtiennent une structure ferme, indiqué par un score de 3. La compaction sur ces sites est plus importante, limitant la porosité et l'infiltration de l'eau, pouvant nuire au développement des plantes, bien qu'un développement important de la végétation n'est pas attendu sur ces sites.

Le site **Total** quant à lui a une structure intact avec un score de 2. Cependant, ce sol étant très caillouteux, le test à la bêche n'a pu être réalisé que sur les 5 premiers cm du sol, entraînant un biais dans les résultats de ce site, puisqu'il est conseillé d'atteindre 25 cm de profondeur.

Tableau 11 - Structure des sites de Louvain-la-Neuve

Site	Score	Qualité de la structure
Témoin	2	Intact
Lapin	1	Friable
Bruyères	1	Friable
Moulin	1	Friable
Baraque	2	Intact
Ste Barbe	3	Ferme
Ephec	3	Ferme
Blocry	3	Ferme
Q8	3	Ferme
Total	2	Intact

5.4. Caractéristiques biologiques des sites

5.4.1. Tea bag Index

Malgré des efforts de recherche et de récupération, un nombre significatif de sachets de thé n'ont pas pu être retrouvés dans les sites d'étude : seuls 35 sachets. De plus, certains sachets de thé (12) ont été retrouvés troués, rendant les données inexploitablees puisque de la terre a pu s'introduire dans le sachet. Finalement, seuls 23 sur les 180 sachets initiaux représentent des données exploitables. Des résultats n'ont été récoltés que pour quatre sites et aucun parc n'est représenté. Les étiquettes n'ont pas été suffisamment mises en évidence (le but ayant été de ne pas être à la vue des passants en milieu urbain) et la végétation s'étant fortement développé lors de la période d'incubation, il était très compliqué de retrouver les sachets dans certaines zones. Il est important d'interpréter les résultats avec précaution en raison du fait que le nombre d'échantillons des sites représentés est très hétérogène ayant une influence sur la représentativité statistique des résultats.

Le TBI (vert) moyen est de 0,45 et il oscille entre 0,44 et 0,48 alors que le TBI (rouge) moyen est de 0,11 et oscille entre 0,08 et 0,15 (Tableau 12). Cela signifie que certains sachets de thé n'ont presque pas perdu de masse (TBI faible) alors que d'autres ont perdu jusqu'à la moitié de leur masse (TBI proche de 0,5). La tendance générale observée est que les thés verts perdent plus de masse que les thés rouges. La décomposition du thé vert est donc plus importante que celle du thé rouge. Cette différence s'explique par la différence de composition des thés. En effet, le thé vert contient des matériaux organiques plus facilement décomposables alors que le thé rouge contient davantage de matières organiques résistants à la décomposition (Keuskamp et al., 2013). Des données d'incubation de thé dans des sols forestiers à 15 °C ont montré des TBI de 0,67 pour le thé vert et de 0,24 pour le thé rouge (Keuskamp et al., 2013), mettant en évidence que la décomposition des sols urbains est bien plus faible s'expliquant notamment par une quantité de MO stimulant les microorganisme qui est moins abondante.

Total est le site dont la décomposition est la plus faible, soulignant une décomposition relativement faible. Les parking **Ephec** et **Sainte-Barbe** et le site **Q8** obtiennent des TBI similaires qui sont légèrement plus élevés pour les deux types de thés que Total, suggérant une décomposition légèrement meilleure. La moyenne du TBI rouge des sols urbains étudié est deux fois inférieur à celui des sols forestiers, la décomposition des matériaux difficilement décomposables est donc deux fois plus faible. En ce qui concerne le TBI vert, il est de 0,67 pour les sols forestiers contre 0,45 pour les sols urbains. La décomposition des matières facilement décomposables est donc 50 % plus importante dans les sols forestiers que dans les sols urbains étudiés.

Le TBI, qui correspond à la part de matière qui a été décomposée est comparé avec H_g (0,842) qui correspond à la fraction hydrolysable des sachets de thés verts. La matière hydrolysable des sachets de thés verts est supposée être entièrement décomposée à la fin de l'expérience, signifiant que $TBI = H_g = 0,842$ (Mori, 2022). Cependant, tous les TBI obtiennent des valeurs près de deux fois inférieures à H_g . Cela peut s'expliquer car l'expérience a été menée durant 85 jours au lieu de 90, mais surtout car la période d'incubation s'est déroulée en partie durant l'hiver puisqu'elle a débuté le 10 février, ce qui ralentit la vitesse de décomposition. Le facteur de stabilisation moyen est de 0,49 et varie entre 0,43 (Q8) et 0,51 (Total). S est relativement

élevé en comparaison à des données récoltées pour différents usages à travers le Royaume-Uni (Duddigan et al., 2020) dont les valeurs sont généralement comprises entre 0,15 et 0,35. De la même manière, cette différence s'explique par les raisons évoquées précédemment qui sont des conditions expérimentales défavorables.

Le site **Total** présente le S le plus élevé, ce qui suggère une décomposition plus faible. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce S. Tout d'abord, il est possible que la MO présente sur ce site soit plus stable en raison de sa nature récalcitrante qui est différente des autres sites. Ensuite, la présence élevée de Ca^{2+} peut agir comme liant, et donc augmenter la stabilité du sol. Cependant, le faible taux d'argiles chez Total ne permet pas de confirmer cette hypothèse car le Ca^{2+} est un liant principalement entre les argiles et la MO. Enfin, il est également possible que la faible activité de décomposition par les microorganismes sur ce site soit responsable de cette valeur élevée de S.

Tableau 12 - Tea Bag Index et facteur de stabilisation des sites de Louvain-la-Neuve avec entre parenthèses le nombre d'échantillons

	TBI (vert)	TBI (rouge)	S
Ste-Barbe	0,44 (3)	0,15 (2)	0,47
Q8	0,48 (3)	0,10 (1)	0,43
Total	0,41 (7)	0,08 (5)	0,51
Ephec	0,47 (1)	0,13 (1)	0,44
Moyenne	0,45	0,11	0,49
Sols forestiers	0,67	0,24	

5.4.2. Vers de terre

L'abondance moyenne en VDT est de 1 200 individus/m³ et s'étend de 530 (Total) à 2 200 (Baraque) suggérant qu'un ou plusieurs paramètres environnementaux influencent leur abondance (Figure 32). Les abondances en VDT du site **Témoin** est de 1 750 individus/m³ ainsi que des parcs **Baraque**, **Bruyères** et **Lapin** sont supérieurs à 1 400 individus/m³ suggérant des conditions environnementales favorables comme une perturbation humaine relativement faible (exemple : piétinement faible). En revanche, le parc **Moulin** présente une abondance relativement faible d'environ 600 individus/m³, représentant près de 3 fois moins d'individus que les autres parcs malgré des caractéristiques environnementales similaires. Cela peut indiquer des facteurs spécifiques à ce site qui limitent la présence des VDT. Par exemple, le parc était bien plus exposé au soleil que les autres car il est situé sur un versant exposé sud, entraînant un sol plus sec, et donc une abondance moins importante.

Les zones dont l'environnement est davantage artificialisé comme **Total**, **Blocry** et **Ephec** ont des abondances relativement faibles par rapport aux autres sites avec environ 550 individus/m³ suggérant l'impact de l'artificialisation sur la vie dans le sol. Remarquons que l'abondance faible de VDT chez **Total** peut être un indicateur de la pauvreté de l'activité des microorganismes, et donc expliquer un S élevé (Tableau 12). Bien que les sites **Q8** et **Sainte-Barbe** sont fortement artificialisés dans leur environnement (environ 60 %), ils ont une abondance bien plus élevée que les autres sites mentionnés avec 1 600 et 1 200 individus/m³ suggérant la présence d'autres facteurs environnementaux spécifiques à ce site qui compensent partiellement les effets négatifs de l'artificialisation comme une végétation plus dense.

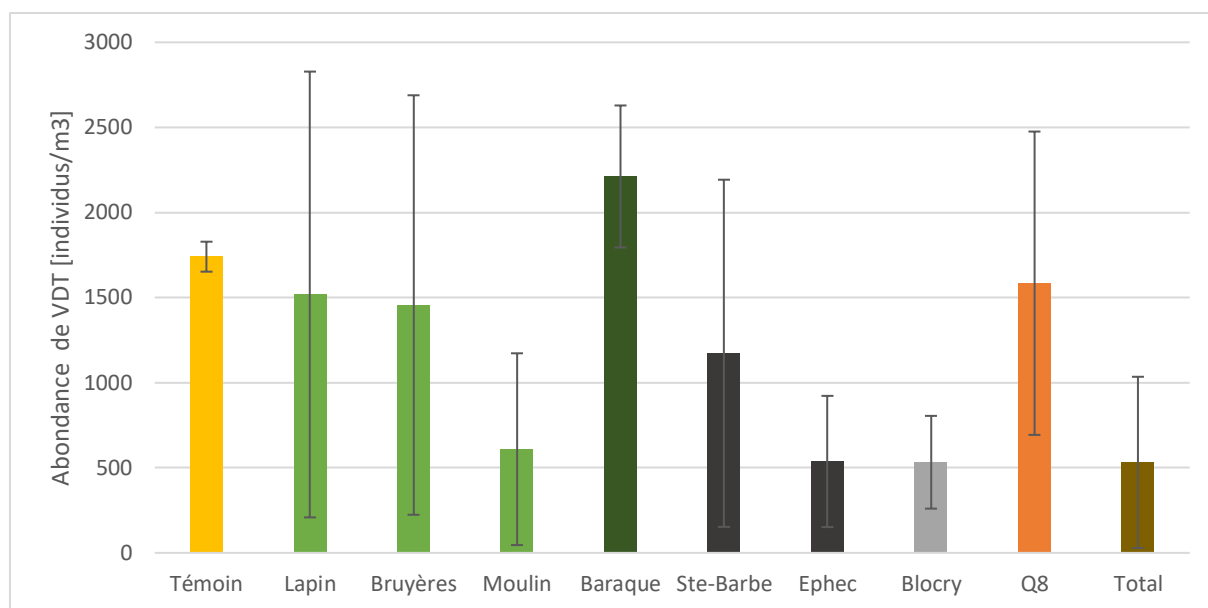


Figure 32 - Abondance des vers de terre [individus/m³] des sites de Louvain-la-Neuve. Les couleurs de la figure correspondent à l'usage des sols décrits dans le Tableau 3.

Ces valeurs sont comparées à des plages de référence (Figure 33) qui définissent les variations moyennes d'abondance de VDT en fonction de l'utilisation des sols (Université de Rennes, 2023). Les sites **Total**, **Blocry** et **Ephec**, dont l'abondance d'individus est relativement faible, se trouvent dans leur gamme de valeur correspondante « Autres milieux artificiels » et même légèrement au-dessus de la moyenne. **Moulin**, classé comme « prairie urbaine » se trouve également dans cette plage, légèrement au-dessus de la moyenne de référence. Cependant, tous les **autres sites** obtiennent des valeurs nettement supérieures aux plages de références, suggérant une abondance de VDT favorable.

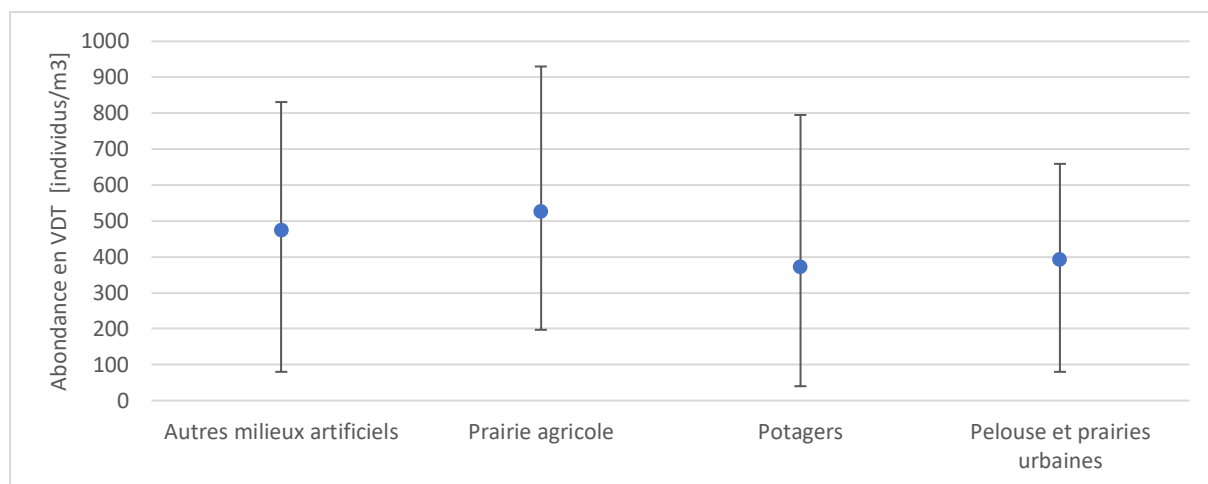


Figure 33 - Gammes de variation pour l'abondance moyenne [individus/m³] selon l'usage du sol (Université de Rennes, 2023). Les points bleus représentent les moyennes observées, l'intervalle représente le 10^{ème} percentile et le 90^{ème} percentile.

Au-delà de l'abondance des VDT, les espèces sont déterminées et le nombre individus de chaque groupe fonctionnel (GF) est dénombré. Certains GF sont plus déterminants que d'autres pour le fonctionnement des sols (Université de Rennes, 2023). Il existe un indice de diversité fonctionnelle qui dépend de l'assemblage des GF présent et qui s'étend de 0 où aucun GF n'est présent à 10 où tous les GF sont présents (Annexe 12)12-06-23 17:41:00 Bien que

l'indice ne prenne pas en compte l'abondance et la complexité de chaque GF, il reste un indicateur de la complémentarité fonctionnelle (Tableau 13). Plus l'indice est élevé, plus la complémentarité fonctionnelle est importante dans le sol.

Tableau 13 - Abondance des groupes fonctionnels de vers de terre [individus/m³], nombre de groupes fonctionnels et indices de diversité fonctionnel

	VDT [ind/m ³]	Epigé [ind/m ³]	Epi-anécique [ind/m ³]	Anécique [ind/m ³]	Endogé [ind/m ³]	GF	Indice
Témoin	1740	0	0	218	1528	2	6
Lapin	1518	0	330	110	989	3	9
Bruyères	1456	136	204	68	885	4	10
Moulin	609	0	0	228	513	1	2
Baraque	2212	55	0	274	1866	3	7
Ste Barbe	1173	0	0	0	1210	1	2
Ephec	537	0	0	69	482	2	6
Blocry	533	0	76	0	455	2	6
Q8	1584	0	0	76	1600	2	6
Total	532	0	0	298	447	2	6

L'indice de diversité fonctionnelle s'étend entre 2 (Sainte-Barbe) et 10 (Bruyères). L'indice le plus élevé est aux Bruyères car quatre GF sont observés sur la parcelle. La tendance est qu'au moins deux GF sont observés sur les sites les moins artificialisés comme le site **Témoin** et les parcs (**Lapin**, **Bruyères**, **Baraque**) mis à part le parc **Moulin** où uniquement des endogés ont été trouvés. Maximum deux GF sont observés sur les sites plus artificialisés comme les parkings **Sainte-Barbe**, **Ephec** mais aussi le **Blocry**, **Q8** et **Total**. Ces résultats suggèrent que l'intensité de l'artificialisation peut avoir une influence sur la diversité fonctionnelle des vers de terre, avec une réduction potentielle du nombre de GF observés dans les environnements les plus impactés par l'activité humaine.

Il convient de noter que des biais méthodologiques sont présents. Le test à la bêche se réalise normalement sur une profondeur de 25 cm. Néanmoins, dans la plupart des cas, il n'a pas été possible de collecter des données à cette profondeur, ce qui pourrait potentiellement surestimer la présence de VDT, notamment de VDT des horizons superficiels. De plus, la méthode recommande un sol plutôt humide, par exemple quelques jours après une forte pluie. Étant donné que l'expérience a été menée en fin mai, période où les précipitations étaient rares, les sols étaient relativement secs, ce qui pourrait potentiellement sous-estimer l'abondance des individus. En revanche, le prélèvement ayant été réalisé le même jour, tous les résultats présentent le même biais, bien que fait à différents moments de la journée (du début de matinée jusqu'au début de soirée) pouvant affecter l'abondance d'individus. Finalement, seuls trois blocs par sites ont été récoltés au lieu de six selon la méthode recommandée entraînant des écarts-types très importants puisque l'abondance observée était très différente d'une zone à l'autre. Ces biais méthodologiques peuvent aussi expliquer la différence entre les abondances de référence et les abondances observées. Cependant, les trois zones ont été choisies pour être assez homogènes entre elles.

6. Discussion générale

Dans cette discussion générale, l'objectif est d'évaluer la santé des sols de chaque site d'étude grâce aux paramètres étudiés. Pour ce faire, les seuils des différents paramètres considérés provenant de la littérature scientifique sont comparés aux données obtenues en tenant compte de l'usage des sols étudiés. Une attention particulière est portée sur les relations existantes entre chaque paramètre afin de mieux comprendre les interactions qui peuvent influencer la santé des sols urbains. Par après, les usages potentiels sont présentés permettant de comprendre davantage les atouts et les inconvénients des sites en termes de capacité à soutenir des fonctions spécifiques comme la pollinisation (potagers urbains, fleurs, fauchage tardif à mettre en place, *etc.*).

Le site Témoin (parcelle agricole) présente des caractéristiques des sols similaires à celles qu'il y avait avant la construction de Louvain-la-Neuve. L'urbanisation de la zone d'étude a engendré des changements significatifs dans les caractéristiques des sols, notamment en raison de l'importation potentielle de volumes de terres exogènes. Ceci a induit des modifications dans les propriétés des sols des sites étudiés. De plus, il est important de noter que l'usage des sols dans les différentes zones urbaines varie considérablement. Chaque site peut être soumis à des usages ou à des activités spécifiques différentes telles que la construction, les zones piétonnes, les parcs récréatifs, *etc.* Il est donc essentiel de reconnaître la variabilité des sols urbains étudiés.

6.1. Corrélations entre les paramètres du sol

Une matrice de corrélation permet de mettre en évidence les relations qui existent entre les paramètres d'étude (

Figure 34). Des relations significatives entre variables semblent se dégager avec de fortes corrélations : le degré d'artificialisation et le niveau de compaction des sols ($r = 0,82$), le taux de saturation et le pH et la CEC et la concentration en cations échangeables Ca^{2+} ($r = 0,89$) et Mg^{2+} ($r = 0,67$). À l'inverse, certaines variables sont anti-corrélées : le pH et l'azote total ($r = -0,66$) et la CEC et la fraction sableuse ($r = -0,69$). Certaines variables sont modérément corrélées (ou anti-corrélée) comme la CEC et la fraction argileuse ($r=0,37$) ou l'abondance de VDT et la fraction sableuse ($r=-0,4$).

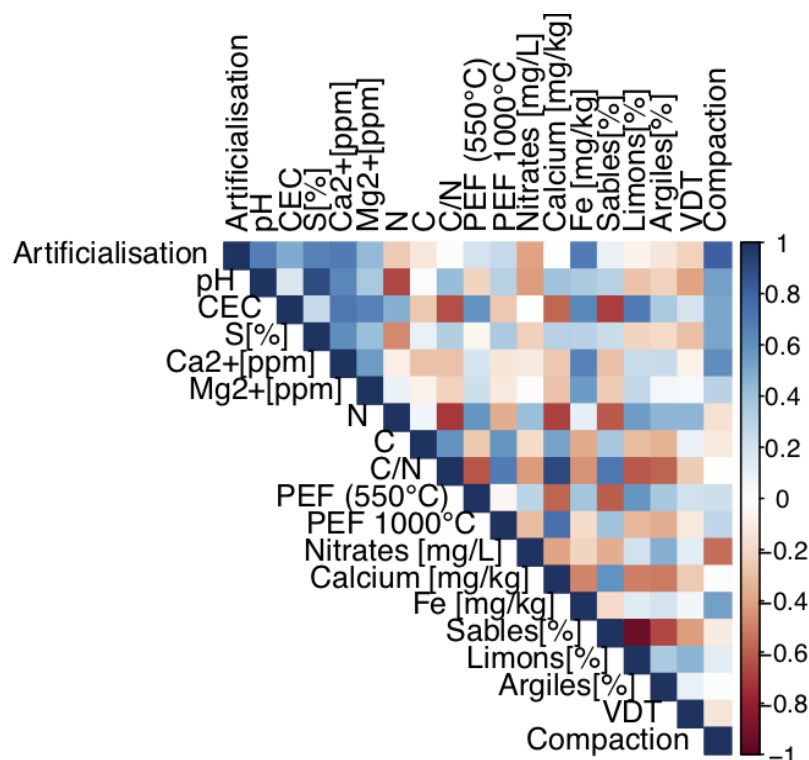


Figure 34 - Matrice de corrélation (coefficient de Pearson) entre les paramètres d'étude au sein des sites de Louvain-la-Neuve. Les termes VDT et PAF correspondent respectivement à l'abondance de vers de terre et à la perte au feu.

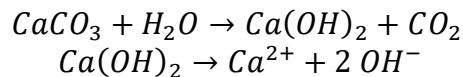
- **Le degré d'artificialisation, principal facteur de la compaction des sols**

Il y a une forte corrélation entre le degré d'artificialisation dans un rayon de 50 m autour du site d'échantillonnage et la compaction des sols ($r = 0,82$). Le site **Témoïn** et les quatre parcs (**Lapin**, **Bruyères**, **Moulin**, **Baraque**) ont une compaction relativement faible avec des sols friables et intact et sont caractérisés par un environnement relativement peu artificialisé (<25 % de surface artificielle dans un rayon de 50 m, sauf pour Baraque qui est caractérisé par un degré d'artificialisation de 41 %). Les sites dont le degré d'artificialisation est plus important (>55 %), tels que les parkings **Sainte-Barbe** et **Ephec**, l'aire de pique-nique (**Q8**) et la zone piétonne (**Blocry**) présentent des structures plus compactes avec des sols qualifiés de ferme. Le degré d'artificialisation peut ainsi servir d'indicateur de l'impact des intensités des activités humaines. Plus les activités humaines sont intenses, plus le risque de compaction du sol augmente. Cependant, il convient de prendre en compte d'autres facteurs qui peuvent également influencer la compaction des sols car le degré d'artificialisation ne prend pas en compte la complexité des activités humaines, de l'usage des sols, etc.

- **Géochimie des sols alcalins**

La présence excessive de Ca^{2+} lors de la mesure des cations échangeables (saturation >100 %) est observée dans quatre sites dont le pH du sol est alcalin (**Blocry**, **Q8**, **Ephec**, **Total**). Ces résultats, couplés aux fortes teneurs en Ca total, permettent de confirmer la présence de CaCO_3 , vérifiée *via* le test qualitatif à l'acide chlorhydrique. Bien que Blocry, Q8 et Ephec n'ont montré qu'une effervescence légèrement visible, tous ces sites révèlent une présence de CaCO_3 . En effet, l'altération des carbonates permet de libérer des ions Ca^{2+} (saturant les sols)

et des ions OH^- (alcalinisant le milieu) ce qui explique la corrélation entre le pH et la présence de Ca^{2+} ($r = 0,65$) :



Cependant, la corrélation observée entre le pH et la présence de Ca^{2+} n'explique pas de manière exhaustive la présence des carbonates, car la présence du cation n'est qu'une résultante de la présence de calcium. Il est important de prendre en compte le calcium total, car c'est lui qui est principalement responsable de la présence de CaCO_3 . La teneur en calcium total des sites alcalins est supérieur à 7000 mg/kg (dont 63 000 mg/kg pour Total) alors que les autres sites ont une teneur moyenne de 4000 mg/kg, confirmant la présence de carbonates pour les sites alcalins, surtout chez **Total**.

La provenance de CaCO_3 peut avoir des origines multiples allant de dépôts géologiques naturels ou de sources anthropiques. Cependant, une des hypothèses avancées est que le CaCO_3 provient majoritairement d'activité humaine, avec notamment les matériaux de construction. En effet, les matériaux comme le ciment, le béton, ou la chaux peuvent libérer du CaCO_3 au fil du temps. La concentration en CaCO_3 est particulièrement élevée pour le site **Total** qui est situé à proximité d'un site de construction. Des concentrations relativement faibles s'observent pour les trois autres sites qui sont également placés à côté de bâtiments. Le site **Blocry** est situé juste à côté du bâtiment de l'Institut des Arts de Diffusion (IAD) qui a vu le jour en 2015. Le site **Ephéc** est placé sur un parking bétonné à côté de la Haute école. Le site **Q8** se trouve juste à côté d'une pompe à essence. La proximité avec ces zones qui ont connu des constructions de bâtiments assez récentes pourrait expliquer la présence de CaCO_3 . De plus, des morceaux de briques ou autres éléments grossiers ont été vus sur plusieurs de ces sites. **Aucun parc**, ni le site **Témoin** ne contient de trace de ce composé, s'expliquant par leur localisation situés relativement à l'écart de sites de constructions. Seul le site **Sainte-Barbe** est placé entre un parking et un bâtiment universitaire et ne contient pas ou très peu de CaCO_3 . Une autre hypothèse est que le CaCO_3 peut naturellement provenir des terres exogènes, c'est-à-dire des terres qui ont été importés sur le site lors des chantiers de construction de Louvain-la-Neuve.

La présence élevée de cation Ca^{2+} laisse supposer que la disponibilité des autres nutriments est limitée en raison de l'occupation prédominante du calcium. Néanmoins, les résultats des analyses contredisent cette hypothèse, révélant que, malgré la présence importante de calcium, les autres éléments ne sont pas moins abondants. Ainsi, il apparaît que la présence accrue de calcium dans ces échantillons de sols n'affecte pas de manière significative la disponibilité des autres nutriments et ne constitue donc pas de préoccupation majeure.

- **Le pH est un facteur déterminant pour le taux de saturation**

Une corrélation significative est observée entre le pH et le taux de saturation ($r = 0,89$). La parcelle **Témoin** et le parc à **Lapins** ont les pH les plus faibles (respectivement, 5,5 et 6,0). Ces sites sont caractérisés par les taux de saturation qui sont également les plus faibles avec respectivement des valeurs de 80 et 82 %. Un pH acide indique une concentration élevée en ion H^+ qui ont tendance à se lier aux sites d'échange des particules de sol. Cela entraîne une compétition avec les cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), réduisant le taux de saturation, et finalement la capacité du sol à retenir ces nutriments. Inversement, les quatre sites à pH les

plus élevés (**Blocry, Q8, Ephec, Total**) sont saturés à 100 % ou plus. Un pH élevé est associé à un taux de saturation plus élevé puisqu'il y a moins d'ion H^+ , réduisant la compétition avec les cations échangeables qui se lient plus aisément aux sites d'échange de la CEC. La corrélation observée entre le pH et le taux de saturation renforce l'idée que le pH joue un rôle clé dans la disponibilité des cations échangeables dans le sol.

Un pH situé entre 6,5 et 7 semble idéal concernant la disponibilité des minéraux car ce pH correspond à un taux de saturation optimal situé autour de 90 % (Bucaille, 2020). Une CEC saturée à 90 %, est plus propice à une bonne fertilité du sol puisqu'une majorité des sites d'adsorption sont utilisés par les cations nutritifs essentiels, mais sans atteindre une saturation excessive pouvant entraîner des problèmes de lixiviation des éléments nutritifs. Les sites dont la saturation est incluse dans cette fourchette idéale sont le parking **Sainte-Barbe** et les parcs de la **Baraque, Bruyères** et de **Moulinsart**. Les quatre sites à pH alcalin (**Blocry, Q8, Ephec, Total**) sont, quant à eux, saturés et ne sont donc pas optimaux d'un point de vue fertilité du sol. La parcelle **Témoin** et le parc à **Lapins** sont eux légèrement trop acides, ce qui rend leur taux de saturation relativement plus faible, la disponibilité en nutriments est davantage limitée que pour les autres parcs. Néanmoins, cette acidité peut être corrigée grâce à un chaulage, ce qui peut contribuer à remonter le taux de saturation, et donc être propice à une meilleure fertilité du sol.

- **La contribution de la matière organique et de la fraction argileuse pour la CEC**

Une corrélation significative est observée entre la CEC et la MO déterminée à partir de la PAF550 ($r = 0,6$). Cela s'explique car la MO est riche en charges négatives, et peut donc retenir davantage de cations positifs, favorisant ainsi une CEC plus élevée. Plus le contenu en MO est important, plus la capacité du sol à retenir des cations est importante. De façon intéressante, la teneur en argiles ne montre pas de corrélation positive significative ($r = 0,37$), ce qui indique que soit celle-ci joue peu sur la CEC. Cependant, elle n'est pas assez contrastée d'un site à l'autre (de 9 et 31 %) pour montrer une relation à l'échelle des sites étudiés. Néanmoins, la MO contribue davantage à la CEC (Tableau 14) que la fraction argileuse car elle comporte plus de sites d'échanges que l'argile (Munroe et al., 2015), ce qui explique cette différence de corrélation. La corrélation entre la CEC et la fraction sableuse est quant à elle fortement négative ($r = -0,69$). Les sables, de par leur faible surface d'échange, retiennent moins les cations échangeables, entraîne davantage de lixiviation de ces cations, étant néfaste à une bonne CEC. Cette corrélation est renforcée par la présence d'une grande variabilité au sein de la fraction sableuse, qui s'étend de 9 (Témoin) à 70 % (Total).

Tableau 14 - CEC typiques des textures (Munroe et al., 2015)

Matière	CEC [cmol _c /kg]
Sol sableux	2 – 10
Sol limoneux	7 – 25
Sol argileux	20 – 40
Matière organique	200 – 400

- **Les facteurs affectant l'abondance des vers de terre**

Aucune corrélation significative entre l'abondance de VDT et d'autres paramètres n'est observée. Cela s'explique notamment par : leur variabilité naturelle ; les effets non-linéaires avec d'autres variables (par exemple les VDT apprécient une plage de pH ni trop acide, ni trop alcalin) ; les paramètres externes non étudiés comme la présence de prédateurs (oiseaux, taupes, *etc.*) Par exemple, l'abondance de VDT relativement faible du site Total peut être expliquée par des facteurs externes tels que le passage répété d'engins de chantiers et le remaniement fréquent du sol, perturbant le sol.

Cependant, l'abondance de VDT a parfois des corrélations modérées avec certains paramètres. Tout d'abord, il y a une légère anti-corrélation entre l'abondance de VDT et le pH ($r = -0,39$) qui suggère que ces organismes préfèrent des sols légèrement acides. La plupart des espèces de VDT apprécient des pH plutôt neutres, mais peuvent tolérer une gamme davantage acide de pH qui s'étend entre 5,0 à 8,0 (Edward and Bohlen, 1996). Néanmoins, le site Total peut représenter un artefact et causé cette anti-corrélation. En effet, il est probable que ce ne soit pas le pH de ce site qui soit responsable de la faible abondance de VDT mais plutôt sa compaction élevée à première vue (la méthode VESS n'a pas pu être réalisée correctement sur ce site car ce dernier présente une trop grande quantité d'éléments grossiers pour permettre d'atteindre une profondeur optimale pour le test) qui est donc peu propice à l'activité biologique des VDT.

Ensuite, une légère anti-corrélation s'observe avec la fraction sableuse ($r = -0,41$) qui montre que les VDT semblent apprécier des sols qui ne contiennent pas trop de sables, et préfèrent des sols dont la texture est équilibrée (Edward and Bohlen, 1996). Néanmoins, Total peut de nouveau représenter un artefact pour cet analyse car il est de loin le plus sableux (70%).

Enfin, une corrélation modérée existe avec l'azote total du sol ($r = 0,45$) qui s'explique par l'action jouée par les vers de terre sur la minéralisation de la MO du sol (Chauhan, 2014). De plus, ces animaux se nourrissent de la MO qui contient de l'azote, la présence d'azote en quantité suffisante favorise la disponibilité en nourriture pour les VDT, et donc leur abondance.

6.2. Discussion de la santé globale des sites urbains et usages potentiels

Après avoir évalué individuellement chaque paramètre clé des sols urbains étudiés, les résultats sont croisés et interprétés afin d'évaluer la santé globale de ces sites pour permettre d'avoir une vue d'ensemble sur la santé et la fertilité des sols urbains. En examinant les corrélations entre ces paramètres et en les comparant aux seuils recommandés, il est possible de déterminer si ces sols urbains présentent une bonne santé globale ou s'ils nécessitent des améliorations. Cette évaluation de la santé des sols urbains est essentielle pour la planification et la gestion des espaces urbains, en veillant à ce que les sols fournissent les services écosystémiques essentiels pour leur usage.

De manière générale, aucun site n'est pollué par les ETM étudiés (Pb, As, Zn, Cu, Cr, V) puisque les concentrations observées sont inférieures aux seuils fixés par le Décret sols. De plus, aucune des concentrations en calcium, en fer et en manganèse ne dépassent les limites considérées comme excessives ou indiquent des carences. Bien que les concentrations élevées en calcium puissent entrer en compétition avec les autres éléments et entraîner la diminution de leur concentration, comme dans le cas des éléments Fe et Mg qui sont plus faibles chez Total, elles restent largement supérieures aux seuils recommandés, ce qui n'indique pas de préoccupation notable. Cependant, les concentrations en cations échangeables Na^+ et Mg^{2+} sont quant à elles relativement préoccupantes puisque tous les sites obtiennent des valeurs inférieures aux références, révélant la pauvreté de ces éléments à Louvain-la-Neuve, ce qui n'est pas optimal pour la croissance de la végétation. La compaction des sites est généralement plus élevée pour les sites dont le degré d'artificialisation est plus important comme les parkings et les zones piétonnes. Néanmoins, aucun site ne présente une compaction excessive, ce paramètre ne semble donc pas être une préoccupation majeure. L'activité biologique est quant à elle assez bonne : bien que des différences d'abondance ont été observées, tous les sites présentent une abondance suffisante en VDT, parfois bien supérieures aux moyennes de référence.

6.2.1. Site Témoin

Le pH acide du site **Témoin** de 5,5 peut avoir un impact sur la disponibilité des nutriments. Cela se reflète sur son taux S de 80 % qui est le plus faible parmi tous les sites. Un chaulage peut être considéré afin de remonter le pH de la parcelle. De plus, la concentration en nitrates est relativement faible ce qui est surprenant pour une parcelle agricole, bien que cette prairie n'ait peut-être pas été fertilisée. La granulométrie de ce site est très limoneuse, ce qui indique un sol assez fertile pour un usage agricole. Cependant, un sol trop limoneux peut être un problème car elle facilite la formation de croûte de battance. La battance peut être limitée en ajoutant ou en conservant une bonne teneur en MO dans le sol. Finalement, la santé du site reste relativement satisfaisante puisque sa CEC de $10 \text{ cmol}_c/\text{kg}$ est suffisante, que son rapport C/N est optimal, que son abondance en VDT est relativement élevée et qu'il n'y a pas de préoccupation majeure concernant les autres paramètres.

6.2.2. Parcs

Pour les sols des parcs **Moulin**, **Bruyères** et **Baraque**, plusieurs aspects favorables à la santé et à la fertilité du sol se dégagent. Tout d'abord, ces sites présentent un pH optimal qui permet une répartition des éléments sur la CEC équilibrée, favorisant ainsi la disponibilité adéquate des différents nutriments. De plus, les teneurs en azote et en carbone de ces sols sont satisfaisantes, avec un rapport C/N situé entre 10 et 11, permettant aux microorganismes de bénéficier d'une source d'énergie en utilisant le carbone et de synthétiser efficacement les protéines grâce à l'azote. Les concentrations en nitrates situées entre 20 et 65 mg/kg permettent un bon développement des plantes. Enfin, la CEC des sols, estimée à environ 10 cmol_c/kg, est également satisfaisante pour la fertilité, offrant une capacité de rétention et de libération appropriée des cations. Il faut tout de même remarquer que **Moulin** et **Bruyères** ont une fraction argileuse faible (environ 15 %) n'étant pas idéale pour participer à la CEC. De plus, l'abondance en VDT de **Moulin** est relativement plus faible que pour les autres parcs, mais elle n'est pas préoccupante puisqu'elle reste dans la moyenne des valeurs de la littérature. Les observations globales témoignent de la bonne santé et de la fertilité de ces sols. Le site **Lapin** ne présente pas de carence importante en termes de carbone, d'azote total, de nitrates ou de cations échangeables. Cependant, il présente quelques limitations par rapport aux trois sites précédents, notamment un pH plus faible de 6 pouvant diminuer la disponibilité de certains éléments comme le Mg, ainsi qu'une CEC de seulement 8,1 cmol_c/kg, inférieure à celle des autres parcs. Malgré ces aspects, le site **Lapin** conserve une bonne santé et demeure propice à un bon développement de la végétation.

6.2.3. Zones artificialisées

Bien que les sites **Blocry** et **Q8** ont tous les deux un pH élevé ainsi qu'une CEC saturée, ils ne présentent pas de carence significative excepté le site **Q8** dont la concentration en nitrates est très faible avec seulement 3,3 mg/kg. Leur contenu en azote et en carbone est suffisant et leur rapport C/N est correct. Leur granulométrie est similaire et équilibrée, révélant un compromis entre la perméabilité du sol et une bonne CEC. L'abondance en VDT est relativement élevée chez **Q8**, mais assez faible au **Blocry** sans pour autant être une source d'inquiétude. Ces sites peuvent donc être considérés comme étant en bonne santé, tout en veillant à surveiller leur pH.

Le site **Sainte-Barbe** présente des caractéristiques contrastées en ce qui concerne la santé du sol. Il présente une carence en potassium et une concentration en nitrate de 10 mg/kg qui est relativement faible, ainsi qu'une granulométrie principalement sableuse et peu argileuse. Ces paramètres ne sont pas idéaux pour le développement potentiel de plantes. Bien que ce ne soit pas la fonction de ce sol, la fonction de pollinisation pourrait être meilleure sur ce site afin d'améliorer la continuité écologique au sein du centre urbain. Cependant, les contenus en carbone et en azote sont suffisants tout comme la CEC de 10 cmol_c/kg, une abondance en VDT se trouvant dans la moyenne, ainsi qu'un taux de saturation de 94 % qui est idéal. Le site présente une santé satisfaisante et offre un potentiel intéressant pour des améliorations futures.

Bien que la CEC du site **Ephéc** soit élevée, avec une valeur de 11,4 cmol_c/kg, il est important de prendre en compte d'autres paramètres pour évaluer la fertilité d'un sol. En effet, les

concentrations en azote (0,09 %) et en carbone (0,87 %) du site sont inférieures aux seuils recommandés de respectivement 0,1 et 1 %. Ces éléments sont essentiels pour la santé du sol car ils fournissent des nutriments nécessaires aux microorganismes qui régulent la décomposition des éléments et favorisent la croissance des plantes. De plus, Ephec présente une concentration en NO_3^- inférieur aux autres sites, une carence en élément K^+ échangeable, ainsi qu'une abondance en VDT relativement faible. Finalement, le pH élevé lié à la saturation du site ne semble pas idéal concernant la disponibilité des nutriments. Par conséquent, la fertilité du site Ephec pourrait être compromettante en raison de ces facteurs. Cependant, un apport en engrais afin d'améliorer les contenus en azote, en carbone organique, et en cations échangeables couplé à la granulométrie équilibrée et à sa CEC élevée permettrait d'obtenir un site en bonne santé.

6.2.4. Zone non-affectée

Concernant le site **Total**, les paramètres analysés mettent en avant la faiblesse du potentiel de végétalisation du site. Tout d'abord, la présence excessive de carbonates entraîne une augmentation du pH ainsi qu'une saturation de la CEC, ce qui conduit à une diminution généralisée des concentrations en éléments, notamment en Fe et en Mn. Cependant, cette saturation par le calcium ne semble pas affecter les autres cations échangeables dont les concentrations ne sont pas inférieures aux les autres sites. Ensuite, le contenu en azote de 0,06 % est en deçà du seuil recommandé (entre 0,1 et 0,2 %), ce qui peut être problématique pour le métabolisme des microorganismes qui habitent le sol et peut donc ralentir le processus de décomposition. Par ailleurs, l'absence de concentration en nitrates constitue une contrainte pour le développement des plantes. Le rapport C/N est très élevé (17,1) et n'est pas optimal à cause de la faiblesse du taux d'azote total (0,06% alors que la moyenne des sites est de 0,13%). Finalement, l'abondance en VDT est relativement faible et la CEC du site de 5,6 cmol_c/kg est insuffisante pour assurer une fertilité adéquate du sol. Elle est influencée en partie par la granulométrie très sableuse du site. Ces observations concordantes témoignent de la mauvaise santé du site, le rendant peu propice à un développement végétal optimal. L'apport d'engrais peut potentiellement améliorer la santé du site. Néanmoins, la granulométrie du site compromet la santé optimale du site.

6.2.5. Classification des sites d'études en fonction des paramètres

L'analyse en composantes principales (ACP) (Figure 35 & Figure 36) réalisé sur différents paramètres de la santé des sols permet de fournir une vision globale et synthétique des relations entre les différents paramètres du sol, facilitant ainsi leur interprétation. L'ACP met en évidence les relations cachées entre les variables de santé du sol. En regroupant les paramètres qui varient de manière similaire, l'ACP permet d'identifier si plusieurs variables peuvent être corrélés si elles sont groupées, ou anti-corrélés si elles sont en opposition. L'ACP révèle deux tendances majeures.

La première tendance majeure (Figure 35), mise en évidence par la première dimension de l'ACP (représentant 36,2 % de la variation totale) révèle une distinction significative entre les éléments de fertilité, tels que la fraction argileuse et limoneuse, la CEC, la MO associée à la PEF550 et l'azote avec des scores positifs, et les sables, le rapport C/N et le calcium total d'autre part avec des scores négatifs. Des niveaux élevés de sables peuvent causer des sols trop

drainants, un rapport C/N excessif peut indiquer une pauvreté en azote et une concentration élevée de calcium peut causer des déséquilibres dans le sol en diminuant la concentration des autres nutriments. En se référant à cette première dimension, la Figure 36 met en avant une différenciation marquée entre le site **Total** et tous les **autres sites**. Cette distinction souligne le potentiel limité de Total en termes de santé des sols et des services écosystémiques qu'il pourrait fournir. Bien que tous les autres sites ne présentent pas toutes les caractéristiques d'un sol en très bonne santé, ils présentent tous un potentiel intéressant pour fournir des services écosystémiques importants au contraire de Total.

La deuxième tendance majeure (Figure 35), mise en évidence par la deuxième dimension de l'ACP (représentant 27,9 % de la variation totale) révèle une distinction significative entre des pH alcalins, la disponibilité en cations échangeables, et dans une moindre mesure la CEC d'une part avec les scores positifs, et les pH plutôt acides, une disponibilité plus faible en cations échangeables et dans une moindre mesure une plus grande disponibilité en azote (notamment en nitrates) et une abondance de VDT avec des scores négatifs. La Figure 36 illustre une différenciation marquée entre les sites artificiels (positif) et les sites moins artificiels comme les parcs et la parcelle Témoin (négatif). Cette distinction met en avant les forces et faiblesses des types de sites. Les sites artificiels (**Blocry, Ephec, Q8, Sainte-Barbe**) ont des pH plutôt alcalins, une concentration en nitrates relativement plus faible mais leur disponibilité en cations échangeables et leur CEC révèle leur potentiel pour le développement de plantes favorisant la fonction de pollinisation dans les centres urbains. Les parcs (**Moulin, Lapins, Bruyères, Baraque**) et la parcelle **Témoin** ont des pH plutôt acides et une disponibilité plus faible en cations échangeables que les sites artificiels mais ils ont dans une moindre mesure un contenu en azote (notamment en nitrates) plus intéressant ainsi qu'une activité biologique de VDT plus importante. La santé de ces sites est satisfaisante pour le développement de plantes vis-à-vis de la fonction de pollinisation, mais elle peut être améliorée en augmentant la disponibilité en cations échangeables grâce à l'utilisation d'engrais, et en augmentant légèrement le pH des sites, par exemple à l'aide de chaux où l'acidité est potentiellement trop élevée comme au site Témoin (pH = 5,5) et au site Lapin (pH = 6,0), ce qui peut être bénéfique pour la disponibilité en nutriments.

La Figure 36 de l'ACP révèle une observation intéressante : les **parcs** occupent une position intermédiaire entre les **sites plus artificiels** et le **site témoin**. Cette observation suggère deux hypothèses possibles. La première hypothèse est que l'usage plus intensif des sols dans les sites artificiels entraîne une divergence des paramètres par rapport à la parcelle témoin. Plus le site est utilisé par l'humain, plus il est possible que les paramètres étudiés soient différents de la parcelle Témoin. La deuxième hypothèse est que les sites artificiels pourraient être plus susceptibles de recevoir des apports de terres exogènes pour la construction par exemple, ce qui pourrait expliquer cette différence. Ces importations de sol pourraient introduire des éléments nouveaux et modifier les caractéristiques du sol dans ces sites. En ce qui concerne les sols, l'usage par l'humain est intermédiaire et l'apport de terres exogènes est moins probable, ce qui peut expliquer son comportement situé entre les sites artificiels et le site témoin.

A. Analyse des variables

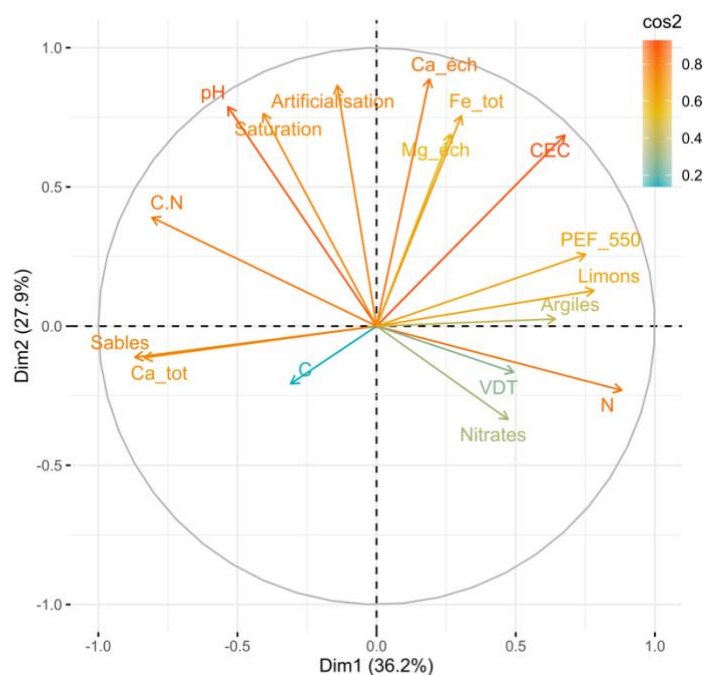


Figure 35 - Analyse en composantes principales des paramètres de caractérisation de la santé du sol des sites de Louvain-la-Neuve présentant les corrélations et anti-corrélations entre les différentes variables . PEF550 = Perte au feu 550°C ; VDT = abondance d'individus en vers de terre

B. Analyse des individus

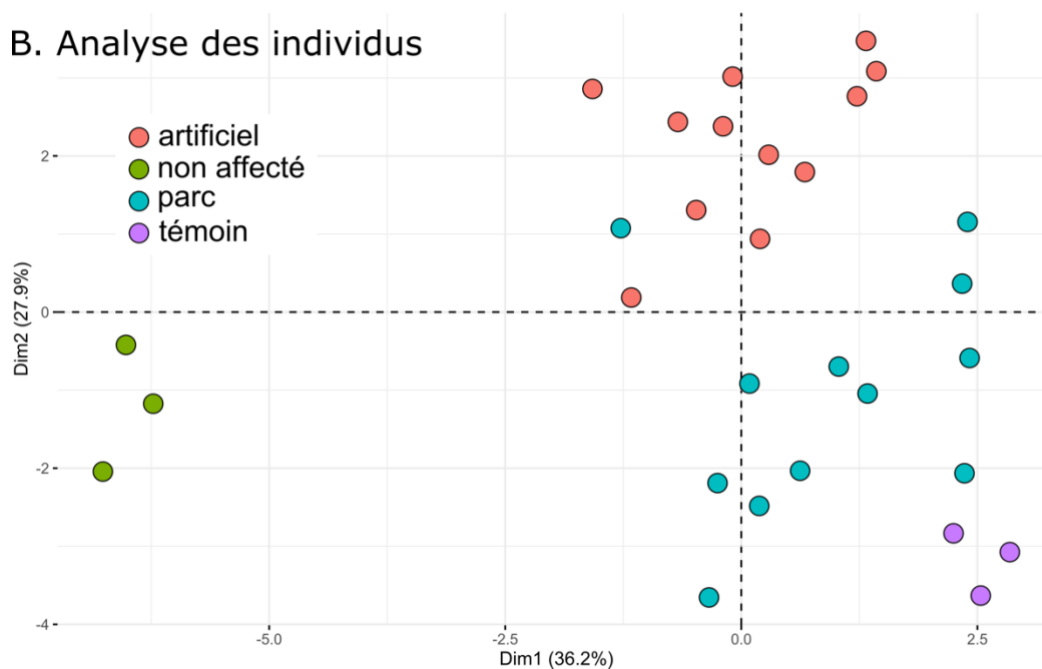


Figure 36 - Analyse en composantes principales des paramètres de caractérisation de la santé du sol des sites de Louvain-la-Neuve les sites répartis en fonction de quatre usages : artificiel (Blocry, Sainte-Barbe, Ephec, Q8), parc (Moulin, Bruyères, Lapins, Baraque), non-affecté (Total), et Témoin

7. Conclusion et perspectives

Ce mémoire s'inscrit dans un contexte global où la santé des sols est en déclin partout dans le monde actuellement en raison de nombreuses menaces comme le changement climatique et le changement d'utilisation des sols ou dans un contexte plus local avec le Plan Transition de l'UCLouvain. Ce travail a pour objectif l'évaluation de l'état de la santé des sols urbains à Louvain-la-Neuve en vue de proposer de potentielles solutions pour améliorer leur santé. L'objectif étant de voir si l'artificialisation a un impact conséquent sur les paramètres étudiés, dix sites à environnement contrastés sont étudiés grâce à une caractérisation chimique, physique et biologique.

Les résultats de cette étude révèlent des caractéristiques encourageantes pour la santé des sols urbains à Louvain-la-Neuve. Dans tous les sites étudiés, une absence de pollution en ETM et une absence de compaction excessive sont constatés. Un potentiel de développement de végétation est remarqué pour la plupart des sites grâce à des mesures de la CEC, des contenus en carbone organique, en azote, des rapports C/N, des nitrates et d'autres cations échangeables ainsi que l'abondance en vers de terre, qui se situent dans des niveaux satisfaisants ou proches des seuils recommandés. De plus, bien que la granulométrie varie d'un site à l'autre, aucun site ne présente une préoccupation majeure en termes de teneur en sable. Cependant, des améliorations sont nécessaires pour certains sites afin d'optimiser leur santé. Par exemple, il est conseillé d'augmenter les niveaux de pH dans les sites Témoin et Lapin qui présentent des pH de 5,5 et de 6,0, car une acidité élevée peut nuire à un taux de saturation optimale et à la disponibilité des éléments. Inversement, il est essentiel de rester vigilant quant aux pH trop élevés dans les zones artificielles, car ces conditions peuvent entraîner une sursaturation et potentiellement une lixiviation des éléments nutritifs. Les parcs affichent des concentrations relativement faibles en cations échangeables, il est conseillé d'apporter des nutriments à ces parcs s'il est souhaité d'optimiser leur santé. En revanche, le site Total présente des caractéristiques préoccupantes et ne présente aucune indication encourageante pour la santé de ce sol. Néanmoins, ce dernier est situé à proximité de chantiers de construction, il n'est pas conseillé de tenter d'améliorer sa santé puisqu'il est sujet actuellement à un remaniement fréquent et à de la compaction à cause des engins de chantiers.

Pour une compréhension plus approfondie de la santé des sols urbains à Louvain-la-Neuve, certaines pistes d'amélioration peuvent être explorées. Tout d'abord, il serait bénéfique d'inclure d'autres types de sites tels que les jardins, qui représentent des environnements semi-artificialisés et peuvent fournir des informations supplémentaires sur l'impact de l'activité humaine sur les sols urbains. Ensuite, en effectuant des ajustements appropriés et en utilisant des méthodes de suivi plus précises, une étude plus robuste du Tea Bag Index pourrait fournir des informations intéressantes car le nombre d'échantillons dans ce travail s'est avéré très faible malgré des efforts de recherche à cause de la difficulté à retrouver les échantillons. Par ailleurs, l'inclusion d'autres paramètres d'analyse peut enrichir l'étude de la santé des sols. Par exemple, une analyse approfondie de la biologie du sol grâce à la respiration du sol et la biomasse microbienne peut offrir des informations sur les processus biologiques clés et leur contribution à la santé des sols. De plus, une analyse physique plus poussée, en examinant des facteurs tels que le stockage d'eau, la densité apparente et la porosité, peut aider à mieux comprendre la structure et la qualité physique des sols urbains. En intégrant ces suggestions

d'amélioration dans de futures recherches, il serait possible de fournir une vision plus complète de la santé des sols urbains à Louvain-la-Neuve afin de mieux orienter les actions de gestion des sols urbanisés.

Dans l'ensemble, cette étude fournit des informations essentielles sur l'état de la santé des sols urbains à Louvain-la-Neuve. Les résultats conseillent de prendre des mesures pour maintenir et améliorer la santé des sols dans les zones urbanisées. Des interventions ciblées, telles que l'ajustement du pH, l'apport de nutriments et la préservation de l'activité biologique, peuvent contribuer à la promotion de sols sains et durables pour la végétation et l'environnement urbain dans son ensemble

8. Annexes

*Parcelle
Témoin*



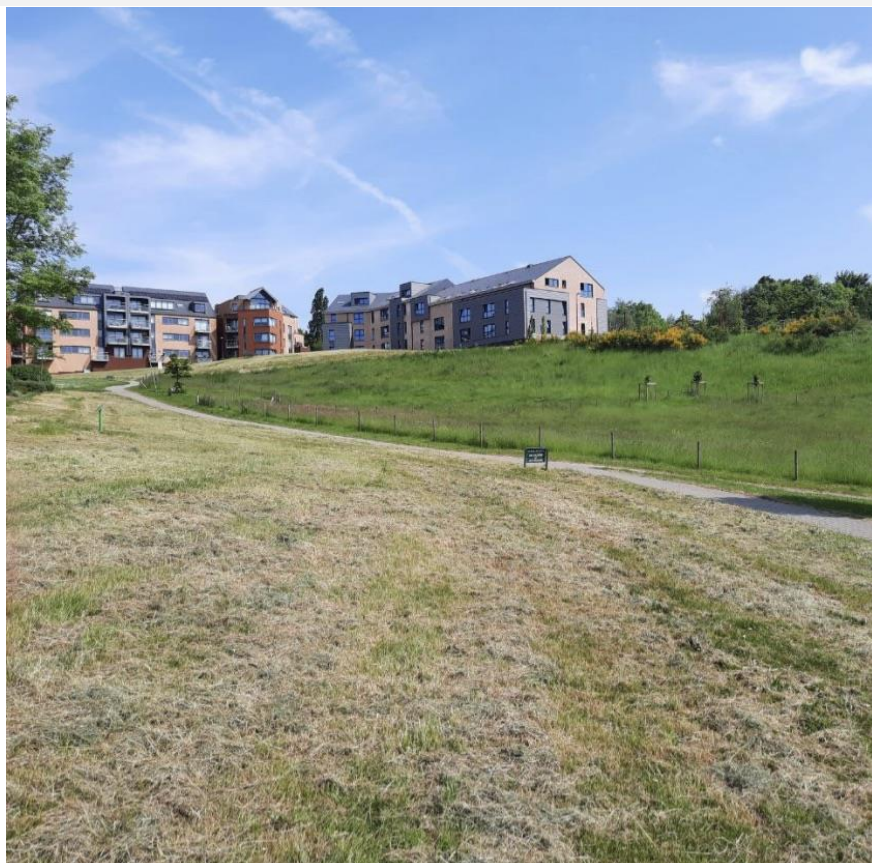
Parc à Lapin



*Parc des
Bruyères*



*Jardin de
Moulinsart*



*Parc de la
Baraque*



*Parking
Sainte-Barbe*



*Parking de
l'Ephec*



Blocry



Pompe Q8



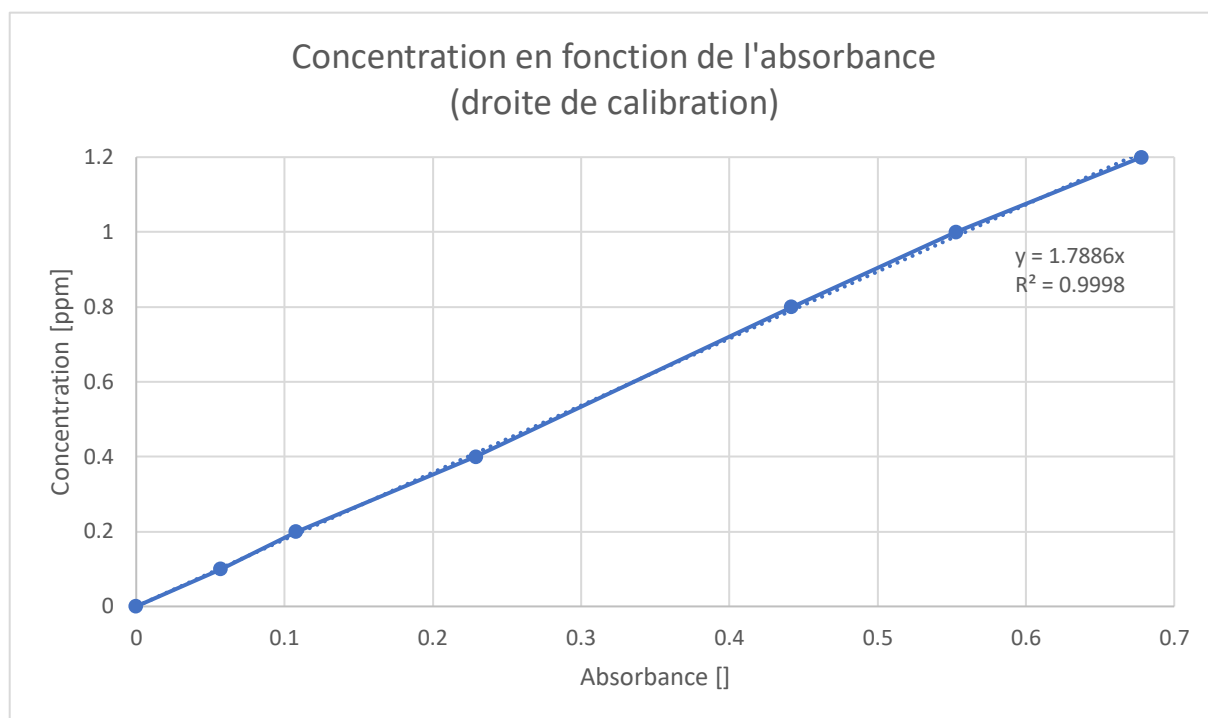
Pompe Total



Sites	Témoïn	Lapin	Bruyères	Moulin	Baraque	Ste-Barbe	Ephec	Blocry	Q8	Total
Artificialisation [%]	3	15	22	25	41	66	56	62	54	33
pH_moy	5,5	6,0	6,6	6,9	6,8	6,9	8,0	7,9	7,9	8,0
pH_sd	0,16	0,28	0,32	0,82	0,63	0,31	0,11	0,03	0,29	0,60
Ca_moy [cmolc/kg]	6,89	5,77	7,58	8,43	10,07	8,55	16,16	15,51	17,29	31,73
Ca_pot [cmolc/kg]	6,89	5,77	7,58	8,43	10,07	8,55	10,07	10,63	11,48	4,69
Ca_supp [cmolc/kg]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,09	4,88	5,81	27,04
K_moy [cmolc/kg]	0,41	0,21	0,26	0,26	0,25	0,17	0,23	0,36	0,28	0,31
Mg_moy [cmolc/kg]	0,61	0,63	0,64	0,91	1,06	0,88	1,00	0,91	1,26	0,59
Na_moy [cmolc/kg]	0,010	0,012	0,006	0,015	0,026	0,010	0,026	0,014	0,034	0,026
Somme BE [cmolc/kg]	7,93	6,62	8,49	9,61	11,41	9,61	11,32	11,92	13,06	5,62
CEC_moy [cmolc/kgsoil]	9,9	8,1	9,1	9,8	12,1	10,2	11,4	11,9	13,1	5,6
CEC_sd [cmolc/kgsoil]	0,65	0,65	0,63	1,19	0,79	0,71	0,88	0,69	1,56	0,72
S [%]	80	82	93	98	94	94	100	100	100	100
N_moy [%]	0,17	0,15	0,14	0,13	0,16	0,14	0,09	0,14	0,13	0,06
N_sd [%]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
C_moy [%]	1,57	1,46	1,40	1,55	1,62	1,52	0,87	1,63	1,59	2,01
C_sd [%]	0,16	0,08	0,05	0,28	0,16	0,22	0,19	0,16	0,34	0,43
CO_moy [%]	1,57	1,39	1,39	1,34	1,73	1,57	1,21	1,60	1,65	1,00
CO_sd [%]	0,12	0,18	0,12	0,06	0,16	0,17	0,19	0,19	0,18	0,04
C/N_moy	9,2	9,4	10,1	10,2	10,7	10,9	14,0	11,4	12,5	17,2
C/N_sd	0,23	0,30	0,24	1,63	0,39	0,89	1,28	0,42	0,61	1,76
PEF 105°C [%]	1,36	1,13	1,14	1,33	1,52	1,36	1,67	1,58	1,76	0,71
PEF 105°C_sd [%]	0,07	0,17	0,04	0,12	0,20	0,07	0,10	0,13	0,09	0,17
PEF 550°C [%]	3,81	3,38	3,36	3,26	4,19	3,80	2,95	3,88	4,00	2,43
PEF 550°C_sd [%]	0,30	0,29	0,15	0,43	0,39	0,46	0,43	0,41	0,47	0,11
PEF 1000°C [%]	5,62	5,12	5,14	5,56	6,44	5,73	5,53	6,55	6,95	8,54
PEF 1000°C_sd [%]	0,29	0,59	0,12	0,36	0,66	0,52	0,44	0,51	0,55	2,19
PEF 1000°C/550°C NO2	1,47	1,70	1,52	1,53	1,54	1,69	1,51	1,74	1,88	3,51
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NO3_moy [mg/L]	10,00	41,50	66,66	20,00	41,50	10,00	15,00	25,00	3,33	0,00
NO3_sd	0	14,43	28,87	8,66	14,43	0,00	8,66	0,00	5,77	0
NH4_moy	0,00	0,00	0,00	3,33	3,33	3,33	0,00	0,00	0,00	0,00

Sites	Témoïn	Lapin	Bruyères	Moulin	Baraque	Ste-Barbe	Ephec	Blocry	Q8	Total
Pb_moy [ppm]	19,51	7,71	12,71	14,10	25,05	10,86	8,76	47,01	19,30	14,31
Pb_sd [ppm]	1,13	2,76	1,67	4,09	3,22	2,65	4,44	28,94	3,97	2,87
As_moy [ppm]	4,38	4,51	7,33	4,65	8,10	5,82	6,95	8,12	6,97	5,28
As_sd [ppm]	0,32	0,63	1,15	1,49	0,87	0,88	0,99	1,25	0,83	0,87
Zn_moy [ppm]	35,03	21,73	34,35	36,03	58,09	29,18	29,45	63,86	41,94	55,90
Zn_sd [ppm]	2,97	3,58	1,99	3,59	11,72	4,55	1,39	10,52	3,95	7,29
Cu_moy [ppm]	11,57	7,53	6,60	10,38	14,14	7,87	11,60	17,42	16,86	15,25
Cu_sd [ppm]	1,38	1,51	1,78	0,79	2,07	2,72	4,91	4,31	1,50	4,60
Fe_moy [ppm]	14566	17106	16594	17679	17673	21109	20902	20687	19796	13440
Fe_sd [ppm]	233	3902	1283	2015	767	952	870	2785	902	2208
Mn_moy [ppm]	419	268	425	312	349	221	303	258	311	149
Mn_sd [ppm]	55	129	36	206	76	20	59	66	54	10
Cr_moy [ppm]	14,76	16,84	21,50	16,76	18,98	20,04	21,13	20,80	21,01	11,45
Cr_sd [ppm]	2,07	9,31	4,34	3,92	3,37	7,35	2,34	0,80	4,00	3,19
V_moy [ppm]	32,31	29,29	35,27	32,54	33,04	28,05	39,00	33,34	38,12	23,74
V_sd [ppm]	3,82	6,00	2,43	4,65	4,79	3,79	3,91	2,26	3,48	3,03
Ca_moy [ppm]	2856,16	3439,67	4174,47	4617,82	4807,86	4674,02	7079,99	7202,45	8950,13	63046,92
Ca_sd [ppm]	123,60	406,36	364,42	1036,08	855,44	466,78	891,69	270,94	4368,51	24678,55
Sables [%]	9,70	38,73	27,61	42,54	11,56	51,49	24,53	21,93	26,24	69,85
Sables_sd [%]	1,98	14,98	0,51	10,17	0,73	9,51	2,81	2,48	10,69	11,23
Limons [%]	64,35	35,20	45,31	44,55	72,01	35,23	52,92	47,01	53,40	21,56
Limons_sd [%]	3,13	12,90	0,31	8,88	1,30	9,06	0,97	3,36	7,93	8,99
Argiles [%]	25,96	26,07	27,08	12,90	16,43	13,28	22,55	31,06	20,36	8,59
Argiles_sd [%]	1,31	2,31	0,53	1,33	0,72	0,74	1,88	1,03	3,37	2,50
Score de la structure	2	1	1	1	2	3	3	3	3	2
Qualité de la structure	Intact	Friable	Friable	Friable	Intact	Ferme	Ferme	Ferme	Ferme	Intact
TBI [vert]	NA	NA	NA	NA	NA	0,44	0,47	NA	0,48	0,41
TBI [rouge]	NA	NA	NA	NA	NA	0,15	0,13	NA	0,1	0,08
VDT [ind/m3]	1740	1518	1456	609	2212	1173	537	533	1584	532
VDT_sd	88	1310	1232	563	417	1020	385	272	891	503

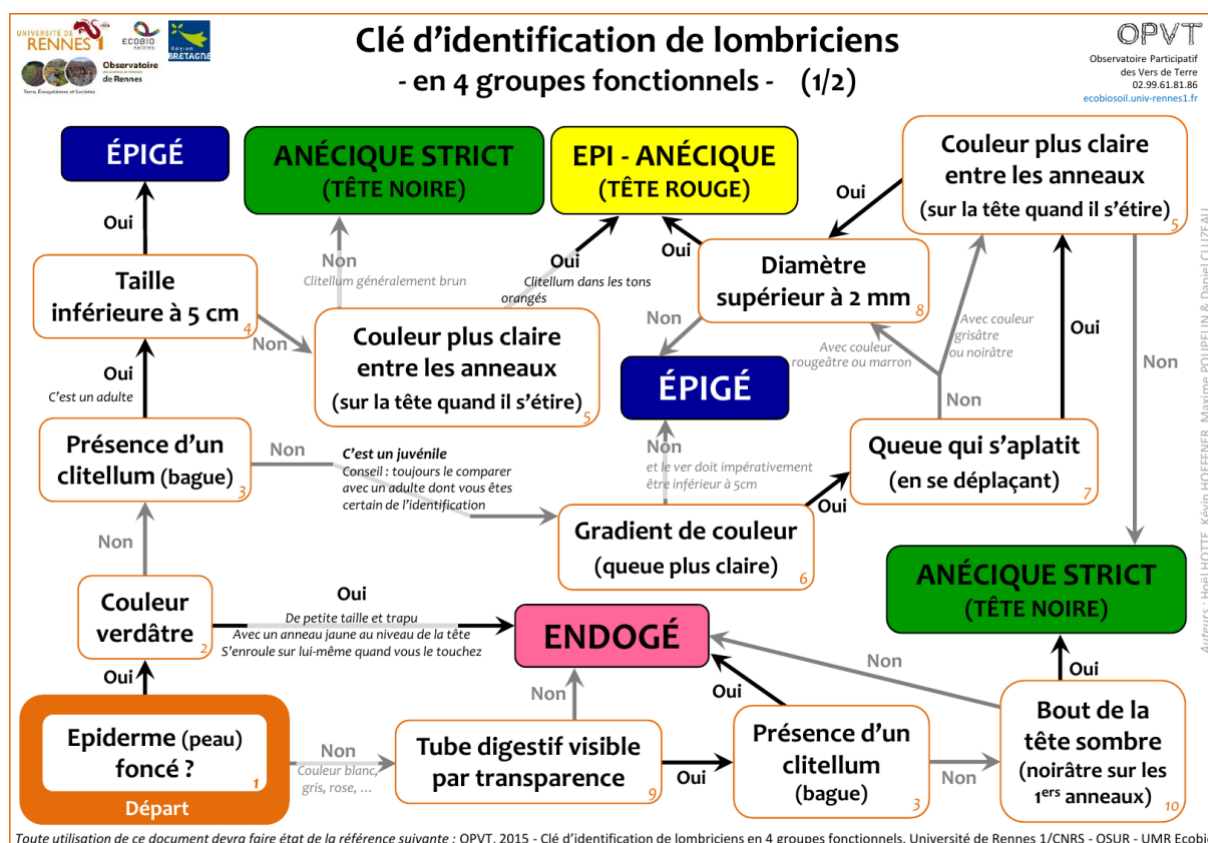
Annexe 2 – Tableau récapitulatif des paramètres des sites d'étude de Louvain-la-Neuve



Annexe 3 – Droite de calibration de la CEC

Qualité de la Structure	Apparence générale	Taille	Racines	Porosité Visible*	Apparence après extraction : même sol mais travail du sol différent		Traits distinctifs	Apparence des agrégats* ou fragments* de ≈ 1.5 cm de diamètre	
Sq1 Friable Agrégats* se désagrègent très facilement avec les doigts	Pas de motte fermée*	La plupart des agrégats* < à 0.6 cm.	Les racines colonisent l'ensemble du bloc : les racines sont bien présentes à l'intérieur et autour des agrégats*	La plupart des agrégats* sont TRES poreux			Agrégats* très fins et poreux		Agrégats* très poreux, composés de plus petits maintenus ensemble par les racines. Ils sont pour la plupart directement obtenus lors de l'extraction du bloc.
Sq2 Intact Agrégats* se désagrègent facilement entre les doigts		Mélange d'agrégats* arrondis de 2mm à 7cm		La plupart des agrégats* sont poreux.			Forte porosité des agrégats*		Agrégats* arrondis, fragiles, poreux qui se cassent facilement.
Sq3 Ferme La plupart des agrégats* se désagrègent facilement entre les doigts	Présence possible de mottes fermées*	Mélange d'agrégats* de 2 mm-10 cm. Moins de 30% <1cm.		Présence possible de pores grossiers visibles* et de fentes de retrait*			Faible porosité des agrégats*		Agrégats* avec peu de pores visibles et plutôt arrondis.
Sq4 Compact Assez difficile de briser les mottes fermées* avec une seule main	Principalement mottes fermées* sub-angulaires	moins de 30% des mottes sont de taille <7cm ; structure lamellaire possible.	Pas ou peu de racines à l'intérieur des fragments*. Les racines présentes sont concentrées autour des mottes fermées, dans les « pores grossiers visibles »* et les fissures*	Peu de « pores grossiers visibles »* et peu de fissures*			Racines dans les pores grossiers visibles*		Ces fragments* de forme cubique à bords anguleux et fissures internes sont faciles à obtenir sur sol humide.
Sq5 Très Compact Très difficile de briser les mottes fermées* avec la main	Principalement mottes fermées* angulaires	mottes angulaires >10cm, très peu de taille <7cm.		Très peu de « pores grossiers »* et de fissures*. Anoxie* possible.			Couleur gris-bleu possible		Ces fragments* à bords anguleux peuvent être difficiles à obtenir même sur sol humide.

Annexe 4 – Évaluation visuelle de la structure du sol



Annexe 5- Clé d'identification des vers de terre

Sites	Latitude [degrés]	Longitude [degrés]	Revêtement artificiel [%]	Constructions artificielles [%]	Sols nus [%]	Couvert herbacé [%]	Résineux [%]	Feuillus [%]	Degré d'artificialisation [%]
Témoin	50,6770	4,6105	3,41	0,00	0,00	83,86	7,54	5,19	3,41
Moulin	50,6608	4,6080	14,70	10,25	0,00	74,53	0,00	0,52	24,95
Lapin	50,6641	4,6165	6,29	9,11	0,18	57,48	0,00	26,94	15,40
Bruyères	50,6630	4,6117	9,09	12,93	0,00	34,60	0,00	38,79	22,02
Baraque	50,6709	4,6233	25,33	16,00	0,00	38,84	0,00	19,82	41,33
Blocry	50,6705	4,6045	37,65	23,81	1,21	16,63	0,00	17,76	61,47
Ste Barbe	50,6679	4,6216	44,49	21,73	0,28	16,68	0,00	15,78	66,22
Q8	50,6676	4,6256	47,66	6,25	0,00	10,86	0,00	32,45	53,91
Ephec	50,6664	4,6125	50,38	5,66	0,00	10,44	0,00	33,01	56,04
Total	50,6724	4,6184	32,61	0,00	0,00	54,58	0,00	12,09	32,61

Annexe 6 – Recouvrement des sols des sites

Type d'usage	Naturel [ppm]	Agricole [ppm]	Résidentiel [ppm]	Récréatif [ppm]	Industriel [ppm]
Plomb (Pb)	120	200	200	390	1840
Arsenic (As)	30	30	40	40	65
Zinc (Zn)	196	196	415	3000	3000
Cuivre (Cu)	53	53	156	490	600
Chrome (Cr)	57	57	78	140	288
Vanadium (V)	100	100	200	200	600

Annexe 7 – Seuils de valeurs considérées des ETM [ppm] selon le décret SOL (Legifrance, 2017)

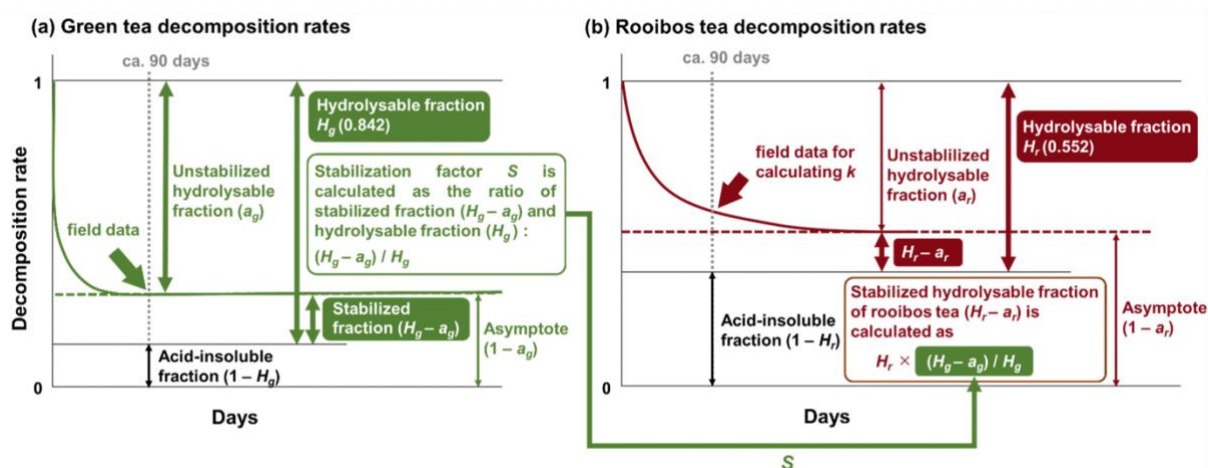
Sites	Ca* [cmolc/kg]	K [cmolc/kg]	Mg [cmolc/kg]	Na [cmolc/kg]	Somme BE [cmolc/kg]
Témoin	6,9	0,41	0,61	0,010	7,9
Moulin	8,4	0,26	0,91	0,015	9,6
Lapin	5,8	0,21	0,63	0,012	6,6
Bruyères	7,6	0,26	0,64	0,006	8,5
Baraque	10,1	0,25	1,06	0,026	11,4
Blocry	10,6	0,36	0,91	0,014	11,9
Ste Barbe	8,6	0,17	0,88	0,010	9,6
Q8	11,5	0,28	1,26	0,034	13,1
Ephec	10,1	0,23	1,00	0,026	11,3
Total	4,7	0,31	0,59	0,026	5,6

Annexe 8 – Cations échangeables moyennes [cmolc/kg] des sites

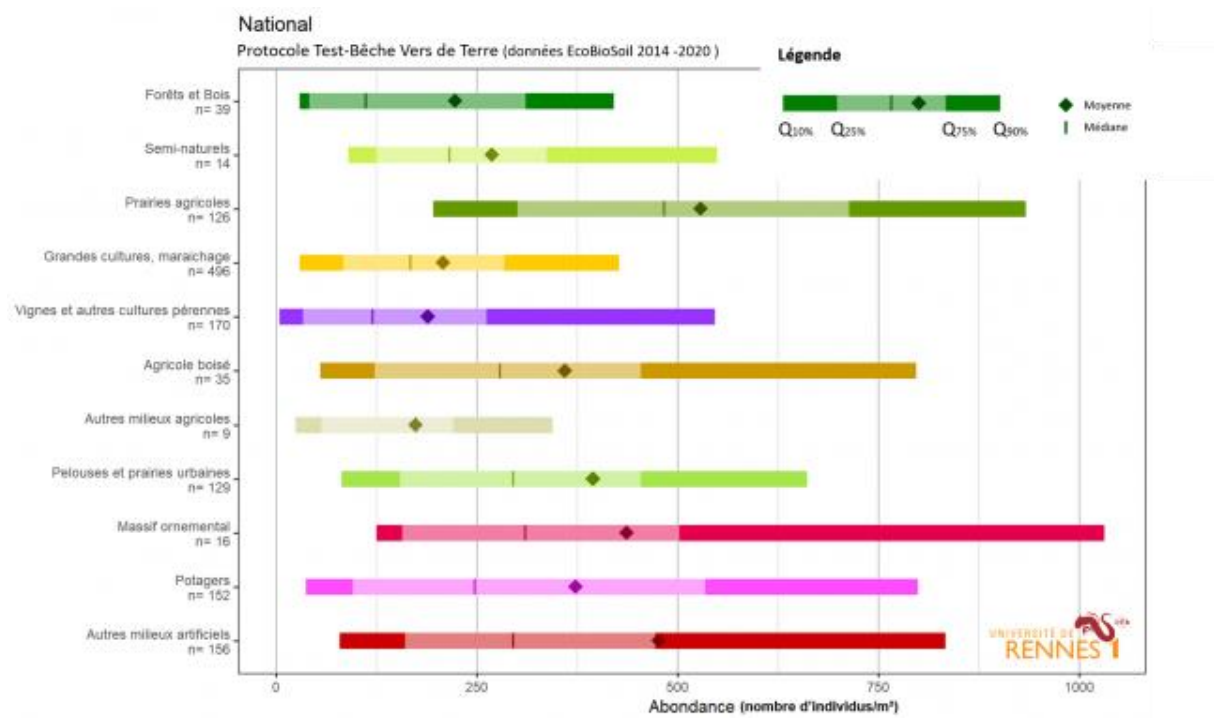
*NB : les résultats bruts obtenus pour le calcium ont été divisés en deux : le calcium potentiel qui est la part de calcium inclut pour la CEC et le calcium supplémentaire issu principalement de l'altération des carbonates, le calcium provient donc du calcium potentiel uniquement.

Sites	Sables [%]	Limons [%]	Argiles [%]
Témoin	10	64	26
Moulin	43	45	13
Lapin	39	35	26
Bruyères	28	45	27
Baraque	12	72	16
Blocry	22	47	31
Ste Barbe	51	35	13
Q8	26	53	20
Ephec	25	53	23
Total	70	22	9

Annexe 9 – Granulométrie moyenne des sites



Annexe 10 - Concept de l'approche du TBI (Mori, 2022)



Annexe 11 – Gammes de variation pour l'abondance moyenne (Université de Rennes, 2023)

Indice	Assemblage	Nombre de Groupe fonctionnel (GF)
0	0 GF	-
1	1 GF	Epi
2	1 GF	End
3	1 GF	EpA ou AnS
4	2 GF	(Epi et End) ou (EpA et AnS)
5	2 GF	Epi et (EpA ou AnS)
6	2 GF	End et (EpA ou AnS)
7	3 GF	(Epi et End) et (EpA ou AnS)
8	3 GF	Epi et EpA et AnS
9	3 GF	End et EpA et AnS
10	4 GF	Epi et End et EpA et AnS

Annexe 12 – Indice de diversité fonctionnelle selon le nombre de groupes fonctionnels présents. Epi = epigé ; End = Endogé ; EpA = épi-anécique ; AnS = anécique

9. Références

- Agnan Yannick et al., 2023. Syllabus de laboratoire de sciences du sol LBIR1336.
- Aurba, 2015. Maîtriser l'imperméabilisation des sols.
- Baize Denis, 2018. Granulométrie et diagrammes de texture — Les Mots de l'agronomie [WWW Document]. URL https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/Granulom%C3%A9trie_et_diagrammes_de_texture (accessed 2.22.23).
- Ball, Guimaraes, Tormena, 2007. Evaluation visuelle de la structure du sol (VESS).
- Baveye, P.C., 2021. Soil health at a crossroad. *Soil Use Manag.* 37, 215–219. <https://doi.org/10.1111/sum.12703>
- Berdanier, C.D., Dwyer, J.T., Heber, D., 2016. *Handbook of Nutrition and Food*. CRC Press.
- Bucaille, F., 2020. *Revitaliser les sols*, dunod. ed. Malakoff, France.
- Capinov, 2023. La granulométrie du sol [WWW Document]. URL <https://www.capinov.fr/la-granulometrie.php> (accessed 2.21.23).
- Chantigny, M., Angers, D., 2005. Activité microbiologique et qualité des sols : quoi de neuf sous nos pieds?
- Chauhan, R.P., 2014. Role of Earthworms in Soil Fertility and Factors Affecting Their Population Dynamics: A Review 1.
- Cheng, S., 2003. Effects of Heavy metals on plants and resistance mechanisms. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 10, 256–264. <https://doi.org/10.1065/espr2002.11.141.2>
- Collaud et al., , 1990. TABLEAU 2: VALEURS CIBLES DE TAUX DE SATURATION POUR LES DIFFÉRENTS CATIONS.
- Cornec, N., 2011. PERSPECTIVES AGRICOLES - N°374 - JANVIER 201.
- Damas, O., Coulon, A., 2016. *Créer des sols fertiles*, Le moniteur. ed. France.
- Edward, C.A., Bohlen, P.J., 1996. *Biology and ecology of earthworms*, Third edition. ed.
- European Commission, 2016. *Soil threats in Europe*.
- European Environment Agency, 2015. Water retention — European Environment Agency [WWW Document]. URL <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/water-retention> (accessed 2.22.23).
- FAO, 2023. Structure du sol [WWW Document]. URL https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f07.htm (accessed 2.21.23).
- Guilland, C., Maron, P.A., Damas, O., Ranjard, L., 2018. Biodiversity of urban soils for sustainable cities. *Environ. Chem. Lett.* 16, 1267–1282. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0751-6>
- Head, J.S., Crockatt, M.E., Didarali, Z., Woodward, M.-J., Emmett, B.A., 2020. The Role of Citizen Science in Meeting SDG Targets around Soil Health. *Sustainability* 12, 10254. <https://doi.org/10.3390/su122410254>
- Hébert, S., Dubé-Loubert, H., 2021. Utilisation du pXRF pour l'analyse des dépôts de surface et introduction au laboratoire mobile du Quatenaire du MERN.

Heiri, O., Lotter, A.F., Lemcke, G., 2001. Loss on Ignition as a Method for Estimating Organic and Carbonate Content in Sediments: Reproducibility and Comparability of Results. *J. Paleolimnol.* 25, 101–110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>

Hofman, G., Cleemput, O., 2004. Soil and Plant Nitrogen.

Institut de recherche pour le Developpement (IRD), 2023. IBQS.

IRM, 2022. Le climat [WWW Document]. Klim. Clim. URL <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/climat> (accessed 2.20.23).

Keuskamp, J.A., Dingemans, B.J.J., Lehtinen, T., Sarneel, J.M., Hefting, M.M., 2013. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods Ecol. Evol.* 4, 1070–1075. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>

Lal, R., 2016. Soil health and carbon management. *Food Energy Secur.* 5, 212–222. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>

Lal, R., 2007. Carbon Management in Agricultural Soils. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 12, 303–322. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-9036-7>

Lehmann, J., Bossio, D.A., Kögel-Knabner, I., Rillig, M.C., 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1, 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>

McCalla, T.M., 2023. Microorganisms and Soil Structure.

Neina, D., 2019. The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2019, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>

NSW, 2021. How earthworms can help your soil [WWW Document]. URL <https://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/soils/guides/soil-biology/earthworms> (accessed 2.22.23).

Ontario, 2023. Macro-éléments et éléments nutritifs secondaires - Llcultures Ontario [WWW Document]. URL <http://www.omafr.gov.on.ca/IPM/french/soil-diagnostics/macro-and-secondary-nutrients.html> (accessed 3.8.23).

Pansu, M., Gautheyrou, J., 2006. Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods. Springer, Berlin ; New York.

Portail Wallonie, 2023. Densité de population en Wallonie. Iweps. URL <https://www.iweps.be/indicateur-statistique/densite-de-population/> (accessed 3.13.23).

Requasud, 2023. Capacité d’Echange Cationique du sol.

Senesil, G.S., Baldassarre, G., Senesi, N., Radina, B., 1999. Trace element inputs into soils by anthropogenic activities and implications for human health. *Chemosphere* 39, 343–377. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00115-0)

Slessarev, E.W., Lin, Y., Bingham, N.L., Johnson, J.E., Dai, Y., Schimel, J.P., Chadwick, O.A., 2016. Water balance creates a threshold in soil pH at the global scale. *Nature* 540, 567–569. <https://doi.org/10.1038/nature20139>

Tibbett, M., Fraser, T.D., Duddigan, S., 2020. Identifying potential threats to soil biodiversity. *PeerJ* 8, e9271. <https://doi.org/10.7717/peerj.9271>

Tourisme olln, 2022. Ce qu’il faut savoir... [WWW Document]. URL <https://www.tourisme-olln.be/decouvrez/une-ville-deux-centres-urbains/ce-qu-il-faut-savoir> (accessed 2.20.23).

UCLouvain, 2021. Plan Transition UCLouvain.

United nations, U., 2018. Around 2.5 billion more people will be living in cities by 2050, projects new UN report [WWW Document]. U. N. URL <https://www.un.org/en/desa/around-25-billion-more-people-will-be-living-cities-2050-projects-new-un-report> (accessed 5.23.23).

Université de Rennes, 2023. Protocole - Test Bêche Vers de Terre - EcoBioSoil [WWW Document]. URL <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-test-beche-vers-de-terre> (accessed 5.30.23).

Vanwindekens, F.M., Hardy, B.F., 2022. The QuantiSlakeTest, dynamic weighting of soil under water to measure soil structural stability (preprint). Soils and managed ecosystems. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1092>

Vincent, Q., Auclerc, A., Leyval, C., 2022. La biodiversité des sols. Encycl. Environ. URL <https://www.encyclopedie-environnement.org/sol/biodiversite-sols/> (accessed 5.29.23).

Vincent, Q., Chartin, C., Krüger, I., van Wesemael, B., Carnol, M., 2019. Université Catholique de Louvain.

Vogel, H.-J., Weller, U., Schlüter, S., 2010. Quantification of soil structure based on Minkowski functions. Comput. Geosci. 36, 1236–1245. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.03.007>

Wallonie Environnement, 2023. Perte de matière organique [WWW Document]. URL <https://sol.environnement.wallonie.be/home/sols/autres-menaces/perde-de-matiere-organique.html> (accessed 3.9.23).

WALOUS, 2018. Occupation du sol en Wallonie - WALOUS 2018 [WWW Document]. URL <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/a0ad23a1-1845-4bd5-8c2f-0f62d3f1ec75.html> (accessed 5.15.23).

Williams, R., Taylor, G., Orr, C., 2020. pXRF method development for elemental analysis of archaeological soil. Archaeometry 62, 1145–1163. <https://doi.org/10.1111/arcm.12583>

Yoro, G., Godo, G., 1990. Les méthodes de mesure de la densité apparente : analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné.

Évaluation de la santé des sols urbains : étude de cas sur le campus de l'UCLouvain

Do Duy Thang Tanguy

La santé des sols est la capacité du sol à fonctionner comme un écosystème vivant et vital qui soutient les plantes, les animaux et les humains. Les sols en bonne santé fournissent une multitude de services écosystémiques tels que la production de nourriture, l'atténuation du changement climatique et le support d'habitat pour la biodiversité. Cependant, la santé des sols est un enjeu majeur car elle est menacée à l'échelle mondiale par des facteurs comme le changement d'utilisation des terres, le changement climatique et le déclin de la biodiversité. Dans le cadre de son Plan transition, l'UCLouvain souhaite « favoriser la faune et la flore, les habitats et les continuités écologiques sur ses sites », en promouvant une plus grande verdurisation des campus *via* des sols en bonne santé. Dans cette optique, l'objectif de ce mémoire est d'évaluer la santé des sols urbains à Louvain-la-Neuve, afin de proposer des solutions potentielles pour l'améliorer. L'évaluation repose sur une caractérisation biologique, chimique et physique de dix sites urbains contrastés dont les degrés d'artificialisation et dont l'usage des sols sont différents, et ce afin de déterminer si l'artificialisation est liée à une détérioration de la santé du sol. Les résultats obtenus révèlent des caractéristiques encourageantes pour la santé de la plupart des sols urbains étudiés. D'une part, les parcs ont montré des pH plutôt acides, une activité biologique plus importante et une disponibilité en nitrates supérieures aux autres sites. D'autre part, les sites plus artificiels comme des parkings ou des zones piétonnes ont montré des pH plutôt alcalins qui entraîne une saturation excessive, mais ils présentent néanmoins des paramètres de fertilité encourageants comme une CEC et une disponibilité en cations échangeables relativement élevés. Bien que des interventions pour la plupart des sites soient recommandées comme l'ajustement du pH, l'apport de nutriments et la préservation de l'activité biologique, il est encourageant de constater que ces sols présentent un potentiel intéressant pour le développement de la végétation. Ce potentiel peut contribuer à renforcer la fonction de pollinisation et à améliorer la continuité écologique en milieu urbain. L'ensemble des résultats obtenus dans ce mémoire permet de faire un premier état des lieux de la santé des sols à Louvain-la-Neuve. Cependant, cette étude peut être étendue *via* l'intégration d'autres types de sites comme des jardins privés mais aussi grâce à l'étude de paramètres supplémentaires.